

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

CARRERA: INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de: INGENIERO ELÉCTRICO

**TEMA:
MODELACIÓN DEL THD EN LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN
RESIDENCIAL**

**AUTOR:
EDGAR GUILLERMO LINCANGO SIGCHA**

**DIRECTOR:
FRANKLIN HERNÁN VÁSQUEZ TENEDA**

Quito, febrero 2015

DECLARATORIA DE AUTORÍA:

Yo, Edgar Guillermo Lincango Sigcha autorizo a la Universidad Politécnica Salesiana la publicación total o parcial de este trabajo de grado y su reproducción sin fines de lucro.

Además declaro que los conceptos y análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad del autor.

Quito, 28 de febrero del 2015

Edgar Guillermo Lincango Sigcha
CC: 1718366956

AUTOR

CERTIFICA:

El ing. Franklin Vásquez Teneda certifica haber dirigido y revisado prolijamente cada uno de los capítulos técnicos y financieros del informe de la monografía, así como el funcionamiento del “MODELACIÓN DEL THD EN LOS SISTEMAS DE ALIMENTACIÓN RESIDENCIAL” realizada por el Sr. Edgar Guillermo Lincango Sigcha, previa a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico en la Carrera de Ingeniería Eléctrica.

Por cumplir los requisitos autoriza su presentación.

Quito, 28 de Febrero del 2015

Ing. Franklin Hernán Vásquez Teneda
DIRECTOR

DEDICATORIA.

Edgar Guillermo Lincango Sigcha

Este proyecto es dedicado con mucho amor a toda mi familia en especial a mi papá Guillermo y a mí mamá Erlinda que con sus esfuerzos y consejos me han sabido educar por el camino del bien; a mí amada esposa Dianita y a mí querida hija Pamelita que un día me inscribieron en esta prestigiosa carrera y que todo se los debo a ellos.

AGRADECIMIENTO.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana por educarme en un ambiente de excelencia, en donde he aprendido valores y me han inculcado principios de lealtad en el diario vivir, un agradecimiento especial al Ing. Franklin Vásquez por su ayuda, paciencia y donación prestada a esta tesis.

Edgar Guillermo Lincango Sigcha.

INDICE GENERAL

DECLARATORIA DE AUTORÍA:	ii
CERTIFICA:	iii
DEDICATORIA.	iv
AGRADECIMIENTO.	v
INDICE GENERAL	vi
INDICE DE FIGURAS	ix
INDICE DE TABLAS	xi
INDICE DE ANEXOS	xiii
GLOSARIO DE TERMINOS	xiv
RESUMEN.....	xv
ABSTRACT.....	xvi
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
1. DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL	2
1.1 Generalidades sobre distorsión armónica (THD)	2
1.1.1 Conceptos técnicos.....	3
1.2 Niveles de voltaje y corriente que se presentan en un sistema de alimentación	5
1.2.1 Requerimiento de voltaje para equipos más comunes	5
1.2.2 Variaciones de voltaje	6
1.2.3 Efectos de las variaciones de voltajes	6
1.3 Efectos que crean los armónicos sobre los sistemas de alimentación residencial.....	7
1.3.1 Efectos en dispositivos y sistemas de baja corriente.....	7
1.3.2 Efectos en condensadores	8
1.3.3 Efecto en transformadores.....	8

1.3.4 Medidores.....	9
1.3.5 Paneles Eléctricos.....	11
1.4 Rendimiento de equipos electrónicos con bajo nivel de THD	11
1.4.1 Equipo electrónico en general	11
1.4.2 Equipo doméstico.....	12
1.5 Modelamiento matemático de cargas no lineales conectadas a la red.....	13
1.6 Características de curvas de distorsión generadas por diferentes equipos electrónicos	14
CAPÍTULO II.....	18
2. PROBLEMAS QUE GENERAN LOS ARMÓNICOS AL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN.....	18
2.1 Armónicos más frecuentes	18
2.1.1 Tipos de armónicos y sus denominaciones	19
2.1.2 Límites de distorsión armónica	20
2.2 Armónicos que generan los equipos eléctricos y electrónicos	24
2.2.1 Fuentes Armónicas.....	27
2.3 Formulación para determinar armónicos en la red	30
2.3.1 La serie trigonométrica de Fourier	31
2.3.2 Filtrado de series de Fourier.....	32
2.3.3 Espectro de onda	34
2.3.4 Mitigación de los armónicos por corriente.....	35
CAPÍTULO III.....	44
3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE ELEMENTOS NO LINEALES	44
3.1 Modelo matemático para armónicos producidos por elementos electrónicos.....	44
3.2 Ingreso de diferentes tipos de datos usando cargas inductivas y capacitivas	46
3.3 Índice de Distorsión Armónica total.....	50

3.3.1 Modelado individual de cada carga.....	50
3.3.2 Modelado en conjunto de todas las cargas	53
CAPÍTULO IV	61
4. ANALISIS DE RESULTADOS-FACTIBILIDAD	61
4.1 Comparación de resultados y rendimiento utilizando filtros en el sistema de alimentación	61
4.2 Mejoramiento de la calidad de servicio mejorando el índice de distorsión armónica.	64
4.3 Evaluación del punto óptimo del sistema de alimentación	66
Conclusiones	68
Recomendaciones	70
Referencias.....	71

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo de una carga residencial, cuya fuente utiliza un Puente rectificador	5
Figura 1.2 Diagrama Unifilar del Sistema de Distribución	6
Figura 1.3 Frecuencia fundamental (60Hz) de onda sinusoidal y armónicos; segundo armónico (120 Hz)	13
Figura 1.4 Tercer armónico (180Hz) y quinto armónico (300Hz)	14
Figura 1.5 Señal de voltaje sin presencia de armónicos	14
Figura 1.6 Señal de corriente con efecto de una carga no lineal en la red.....	15
Figura 2.1 Señal de voltaje con efecto de una carga no lineal en la red residencial.....	19
Figura 2.2 Puente rectificador de media onda	25
Figura 2.3 Gráficas de voltaje y corriente del rectificador de media onda	26
Figura 2.4 Circuito básico cargador de batería	26
Figura 2.5 Cargador de batería usando tiristores	27
Figura 2.6 Ondas de voltaje generadas con cada señal de armónico de la Serie de Fourier	32
Figura 2.7 Composición de cargas en una situación genérica	37
Figura 2.8 Inserción de una inductancia limitadora en el lado de alterna	38
Figura 2.9 Inserción de un transformador (triángulo – estrella)	38
Figura 2.10 Inserción de una carga en zig – zag en paralelo con la carga.....	39
Figura 2.11 Estructura típica de la inserción de un filtro pasivo paralelo	42
Figura 2.12 Estructura típica de la inserción de un filtro pasivo serie.....	43
Figura 3.1 Circuito RLC para la simulación de corriente y voltaje de equipos electrónicos	46
Figura 3.2 Graficas de voltaje y corriente de señal ideal	46
Figura 3.3 Señal de voltaje y corriente de un PC más monitor generada por la serie de Fourier a través de armónicos	48
Figura 3.4 Señal de voltaje y corriente de un televisor generada por la serie de Fourier a través de armónicos	49

Figura 3.5 Señal de voltaje y corriente de una videograbadora generada por la serie de Fourier a través de armónicos	49
Figura 3.6 Señal de voltaje y corriente de una lámpara fluorescente generada por la serie de Fourier a través de armónicos	49
Figura 3.7 Señal de voltaje y corriente de un horno microondas generada por la serie de Fourier a través de armónicos	50
Figura 3.8 THD de computador más monitor con diferente corriente y diferente número de unidades	51
Figura 3.9 THD de televisor con diferente corriente y diferente número de unidades.....	51
Figura 3.10 THD de videograbadora con diferente corriente y diferente número de unidades	52
Figura 3.11 THD de lámpara fluorescente con diferente corriente y diferente número de unidades	53
Figura 3.12 THD de microondas con diferente corriente y diferente número de unidades..	53
Figura 3.13 Serie temporal de la simulación de cargas mediante Montecarlo	55
Figura 3.14 Modelamiento de Montecarlo para una residencia común.....	56
Figura 3.15 Espectrograma generado por las cargas conectadas a la red	56
Figura 3.16 Serie temporal de una residencia de altos recursos simulado con diferentes tipos de carga mediante Montecarlo	57
Figura 3.17 Modelamiento de Montecarlo para una residencia de altos recursos	58
Figura 3.18 Espectrograma de una residencia de altos recursos generado por las cargas conectadas a la red	58
Figura 3.19 Serie temporal de una residencia de altos recursos simulado con diferentes tipos de carga mediante Montecarlo	59
Figura 3.20 Modelamiento de Montecarlo para una residencia de bajos recursos	60
Figura 3.21 Espectrograma de una residencia de bajos recursos generado por las cargas conectadas a la red	60

INDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Factor de distorsión y factor de cresta para varios ángulos de disparo	10
Tabla 1.2 Efecto de Distorsión Armónica Total en el umbral de operación de una fuente de poder típica de una computadora	16
Tabla 2.1 Límites de corrientes armónicas Impares. CEI 555	21
Tabla 2.2 Límites de corrientes armónicas Pares. CEI 555	21
Tabla 2.3 Límites de corrientes armónicas en punto de acoplamiento común.	23
Tabla 2.4. Límites de Distorsión de corriente.....	23
Tabla 3.1 Datos de placa de un horno microondas Panasonic	44
Tabla 3.2 Datos de placa de un horno microondas Panasonic	45
Tabla 3.3 Datos de placa de un horno microondas Panasonic	45
Tabla 3.4 Datos de placa de un horno microondas Panasonic	45
Tabla 3.5 Datos de placa de un horno microondas Panasonic	45
Tabla 3.6 Armónicos del computador más monitor y armónicos de microondas en la red..	47
Tabla 3.7 Armónicos de videograbadora y televisión en la red.....	47
Tabla 3.8 Armónicos de focos fluorescentes conectados a la red	48
Tabla 3.9 Consideración de escenarios para modelación del sistema	55
Tabla 4.1 THD de computador más monitor variando la corriente y el número de unidades	61
Tabla 4.2 THD de televisor variando la corriente y el número de unidades	61
Tabla 4.3 THD de televisor variando la corriente y el número de unidades	62
Tabla 4.4 THD de microondas variando la corriente y el número de unidades	62
Tabla 4.5 THD de horno microondas variando la corriente y el número de unidades	62
Tabla 4.6 THD residencial de estrato económico medio a plena carga.....	63
Tabla 4.7 THD residencial de estrato económico alto a plena carga.....	63
Tabla 4.8 THD residencial de estrato económico bajo a plena carga.....	63
Tabla 4.9 Valores de amplitud para residencia de estatus medio cada armónico según su orden	64
Tabla 4.10 Valores de amplitud para residencia de status alto cada armónico según su orden	65

Tabla 4.11 Valores de amplitud para familia de estatus bajo cada armónico según su orden	66
Tabla 4.12 THD producido por 1PC, 10 fluorescentes, 1 microondas y 2 televisores.....	67
Tabla 4.13 THD producido por 1PC, 10 fluorescentes, 1 microondas y 2 televisores.....	67
Tabla 4.14 THD producido por 1PC, 10 fluorescentes, 1 microondas y 2 televisores.....	67

INDICE DE ANEXOS

A1	Programación del modelo matemático generado en Matlab	77
-----------	---	----

GLOSARIO DE TERMINOS

THD	Distorsión armónica total
A	Amperio
W	Vatio
V	Voltio
I	Corriente
P	Potencia
CC	Corriente Continua
CA	Corriente Alterna
VCC	Voltaje de corriente continúa
VAC	Voltaje de corriente alterna
Hz	Hertz
PCC	Punto de conexión común
CF	Factor cresta
I_{sc}	Corriente de corto circuito
I_L	Corriente de carga

Modelación del THD en los Sistemas de Alimentación Residencial

Edgar Guillermo Lincango Sigcha

edgarlin11@hotmail.com

Universidad Politécnica Salesiana

Resumen— Ante el creciente interés por el cuidado de la calidad de energía en el servicio eléctrico residencial y su alcance en el concepto de la distribución, el presente trabajo tiene como finalidad obtener un modelado matemático el cual sirva para obtener la ecuación característica que sale de una residencia común y que llega a la red de distribución, dicha residencia tendrá varios equipos electrónicos los cuales tienen cargas no lineales que se usan a diario. Calcular el índice de distorsión armónica total será también otro parámetro que podremos hallar con este modelado de manera rápida y sencilla, para este cálculo del THD usaremos herramientas matemáticas como la serie de Fourier como también de la simulación por Montecarlo este último que nos permitirá realizar una convergencia entre las señales de diferentes tipos de cargas conectadas en paralelo que ingresan a la red en distinto tiempo de uso, para luego comparar dichos resultados entre viviendas de tres tipos como puede ser una residencia común, una residencia de altos recursos y una residencia de bajos recursos. Tendremos la ayuda del analizador de energía Fluke 43 B monofásico con el cuál vamos a encontrar los armónicos más característicos presentes al utilizar la videgrabadora, el televisor, el horno microondas, el computador con su monitor y la lámpara fluorescente. Para este acometido se utilizó una interfaz que pasó los históricos generados en el analizador para llevar a un archivo Excel, para que luego esos datos ingresen como un archivo a Matlab y se generen los diferentes tipos de onda de corriente y voltaje con las cuales conseguiremos el modelo deseado.

Modeling of the THD in the Residential Power System

Edgar Guillermo Lincango Sigcha

edgarlin11@hotmail.com

Universidad Politécnica Salesiana

Abstract— Faced with the growing interest in the care of the quality of energy in the residential electrical service and its scope in the concept of distribution, the purpose of this paper is obtain a mathematical modeling which will serve to obtain the characteristic equation that comes out of a common residence and comes to the distribution network, this residence will have several electronic equipment which have non-linear loads that are used daily. Calculate the rate of total harmonic distortion is also another parameter that we can find with this modeling quickly and easily, For this calculation of the THD we'll use mathematical tools such as the Fourier series and the Monte Carlo simulation for the latter which will enable us to conduct a convergence between the signals of different types of loads are connected in parallel are admitted to the network in a different time of use, and then comparing these results between homes of three types as you can be a common residence, a residence of senior resources and a residence of low resource. We will have the help of the Fluke power analyzer 43 B single phase with which we are going to find the most characteristic harmonics present when using the VCR, tv, microwave oven, the computer with your monitor, and the fluorescent lamp. This undertaken for a interface is used to step the historic generated in the analyzer to carry to an Excel file, to then enter these data as a file to MATLAB and generate the different types of waves of current and voltage with which we will achieve the desired model.

INTRODUCCIÓN

Los altos índices de contaminación armónica en el servicio eléctrico debido al uso de equipos electrónicos que usan sistemas de rectificación y que por esta razón tienen señales no lineales, ha sido motivo de preocupación. El estudio de este tipo de problemas y debido al incremento excesivo del uso de aparatos electrónicos nos ha llevado a la realización de un modelado el cual nos permitirá conocer el índice total de distorsión armónica seguido de la ecuación de la corriente que ingresa al sistema de distribución dándonos a conocer efectos y consecuencias en transformadores en cables y hasta en los mismos equipos electrónicos.

En este estudio se pretende comparar tres residencias típicas presentes en nuestro medio, una residencia de estrato económico medio es decir para personas de mediana calidad de vida, la segunda para una residencia de estrato económico alto que conste de una calidad de vida alta, así como también de una residencia de estrato económico bajo en la cual solo tenga los servicios básicos es decir una familia de escasos recursos. La eficiencia de este modelado en los sistemas de alimentación residencial conectados a la red permitirá determinar qué tipo de cable es el más apropiado para usarse sí como también el uso apropiado de filtros activos si es necesario, dando como resultado menores pérdidas eléctricas y una mejor calidad en el servicio eléctrico residencial. Con esto también se obtendrá un enfoque más claro para su construcción a gran escala de este modelado, ya que en este estudio, este modelado solo consta de cinco equipos electrónicos básicos como es el uso de computador con su monitor, del microondas, de lámparas fluorescentes, de videograbadoras y de televisores, pero con este modelado puede estudiarse el comportamiento de cualesquier equipo electrónico cuya característica sea tener señal de salida no lineal que podría ser de corriente.

CAPÍTULO I

En este capítulo se hablará del fenómeno de distorsión armónica total, caracterizando fundamentalmente sus efectos primarios y secundarios, a fin de evaluar consecuencia en la red eléctrica. También mencionaremos efectos y consecuencias que contraen equipos eléctricos y electrónicos cuando existe un elevado nivel de THD.

1. DISTORSIÓN ARMÓNICA TOTAL

1.1 Generalidades sobre distorsión armónica (THD)

Podemos determinar que el THD es un parámetro que define, de modo global, la distorsión de una relación entre el valor eficaz del total de las componentes armónicas y el valor eficaz correspondiente a la componente fundamental[1].

“La distorsión armónica total, es una medida de la coincidencia de las formas entre una onda y su componente fundamental” [17].

Podemos determinar la siguiente fórmula para el cálculo de este factor:

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}}{I_1} * 100 \quad (1.1)$$

$$THD_v = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} V_i^2}}{V_1} * 100 \quad (1.2)$$

Dónde:

i = número de armónica

I_1 = valor eficaz de la onda fundamental de la corriente

V_1 = valor eficaz de la onda fundamental de voltaje

k = algún entero

I_i = valor eficaz de la corriente del armónico k

V_i = valor eficaz del voltaje del armónico k

Como se puede observar este factor es aplicable tanto para corriente como para tensión.

Las distorsiones causadas por las formas de onda que son de tensión y de corriente son producidas por la ocurrencia de resonancia con los armónicos de cargas no lineales (equipos electrónicos en su mayoría) que se introducen al sistema eléctrico[2].

En todos los sistemas de distribución es muy común la compensación reactiva con capacitores para mejorar el factor de potencia[2].

1.1.1 Conceptos técnicos

1.1.1.1 Armónico

“Una componente sinusoidal de una onda periódica o cantidad que posee una frecuencia múltiplo de la frecuencia fundamental” [18].

NOTA: Por ejemplo, en una componente, cuando la frecuencia es el doble de la fundamental es llamada segundo armónico.

El mayor grado de generación de armónicos son los equipos electrónicos los cuales tienen uso de circuitos de rectificación o fuentes de poder ya que estos son necesarios para su funcionamiento. Podemos destacar algunos como computadores, televisores, equipos de sonidos, microondas y lámparas fluorescentes[2].

1.1.1.2 Armónico característico

“Aquellos armónicos producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal” [19].

$$h = kq \pm 1 \quad (1.3)$$

Dónde:

k = algún entero

q = número de pulso del convertidor

1.1.1.3 Armónicos no característicos

“Los armónicos no característicos son producidos por equipos convertidores semiconductores en el curso de la operación normal” [20].

Este tipo de armónicos son producidos por:

- Frecuencias oscilatorias.
- Demodulaciones del armónico característico.
- Demodulaciones de la fundamental.
- Desbalance en los sistemas de potencia AC, el ángulo de retardo asimétrico,
- Funcionamiento del ciclo-convertidores.

1.1.1.4 Carga no Lineal

Una carga no lineal es aquella que posee una fuente de alimentación sinusoidal, pero la forma de onda de la corriente tiene una forma no sinusoidal[3].

En todo hogar, los aparatos electrónicos que están en casa como radios, televisores, licuadoras, consolas de video juegos, videograbadoras, y computadoras producen distorsión (armónicos), tanto al voltaje como a la corriente del sistema eléctrico residencial, pues los artefactos antes mencionados poseen fuentes de alimentación que utilizan rectificadores de onda completa para la conversión de corriente alterna (CA) a corriente directa[4].

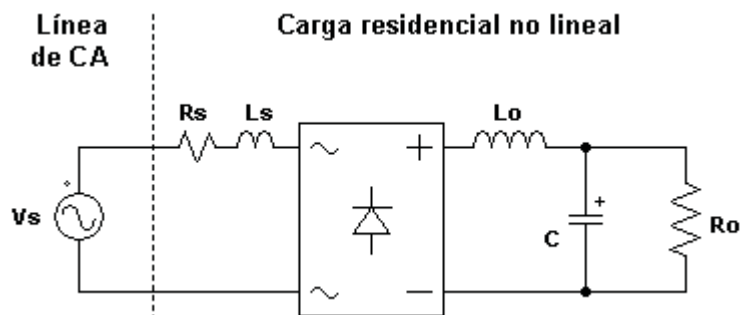


Figura 1.1 Modelo de una carga residencial, cuya fuente utiliza un Puente rectificador
Fuente: Ingeniería Investigación y Tecnología. Vol. XI. Núm. 2. 2010 189-198, ISSN1405-7743 FI-UNAM

1.2 Niveles de voltaje y corriente que se presentan en un sistema de alimentación

La normativa ANSI C84.1-1995 establece los siguientes valores de voltaje:

Bajo Voltaje: Son voltajes nominales de sistemas menores o iguales a 1kV.

Medio Voltaje: Son voltajes nominales de sistemas mayores a 1 kV y menores de 100kV.

Alto Voltaje: Son voltajes nominales de sistemas iguales o mayores que 100 kV e igual que 230 kV.

1.2.1 Requerimiento de voltaje para equipos más comunes

Para establecer los requisitos de energía de un equipo, se debe tener en cuenta los requisitos de entrada de voltaje, y con ello la identificación de voltaje de placa; a continuación unas reglas para la identificación de voltajes:

- Si se tuviera el caso, para cualquier equipo a tratarse o manejarse, se usa el término voltaje de placa, en el cual está especificado todas las características de operación a las que se refiere con el equipo. [10]
- Cuando vayamos a tratar con el sistema, no se usa el término voltaje de placa porque los equipos instalados pueden a menudo tener diferentes voltajes de especificación.

Por lo tanto, el término voltaje nominal del sistema, se usa para designar convenientemente la clase de voltaje de un sistema o circuito. [10]

- En generadores y transformadores, los voltajes generalmente son más altos que los del equipo de placa, para compensar la caída de voltaje entre la fuente y la carga. [10]

1.2.2 Variaciones de voltaje

Las variaciones de voltaje son la diferencia entre el voltaje máximo y voltaje mínimo en un punto particular en el sistema de distribución. Esta escala de variación de voltaje dependerá del punto donde se realice la medición. La *Figura 1.2* muestra la variación de voltaje que ocurre para dos consumidores en demanda máxima y mínima[5].

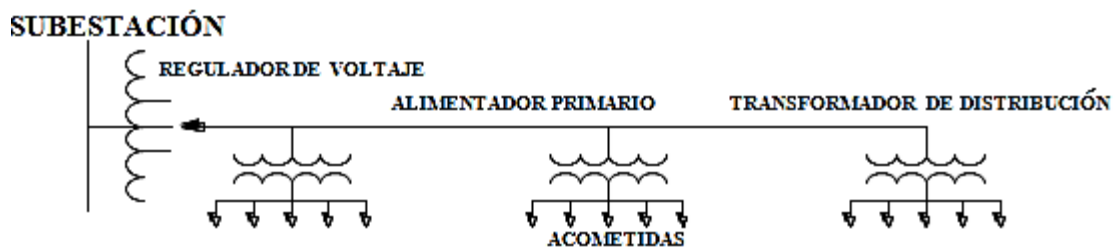


Figura 1.2 Diagrama Unifilar del Sistema de Distribución

Fuente: Westinghouse Electric Corporation, "Electrical Transmission and Distribution Reference Book", Fourth Edition, 1950.

1.2.3 Efectos de las variaciones de voltajes

Este análisis es solamente una visión general de los efectos de las variaciones de voltaje sobre los equipos, que las empresas de distribución deben atender[6].

La correcta operación de equipos eléctricos requiere voltajes de alimentación que estén lo más cercanos posible al voltaje de placa. Incluso desviaciones relativamente pequeñas del valor nominal pueden causar una operación no satisfactoria, por ejemplo, operaciones con eficiencia reducida, o un mayor consumo de energía con las pérdidas adicionales y la reducción de la vida de servicio del equipo. A veces las desviaciones prolongadas pueden causar el funcionamiento de los dispositivos de protección, lo que resulta en interrupciones.

Por supuesto el correcto funcionamiento de los equipos también depende de muchos otros factores, tales como las condiciones ambientales, adecuada selección e instalación[7].

En general, el rendimiento se ajusta a los límites de voltaje de utilización, pero esto puede variar en componentes específicos de equipos sensibles al voltaje. En esta sección se analiza los diversos tipos de problemas de calidad del servicio. Los efectos en la deficiencia de la calidad del servicio pueden ser entendidos de mejor manera al mirar los distintos tipos de cargas que son afectados y a continuación enlistados[6].

1.3 Efectos que crean los armónicos sobre los sistemas de alimentación residencial

Podríamos determinar ciertos efectos que producen los armónicos en la red para diferentes subsistemas y equipos característicos de la misma.

1.3.1 Efectos en dispositivos y sistemas de baja corriente

Como se ha mencionado, el uso masivo de equipos electrónicos hace que la distorsión en los circuitos de distribución crezca paulatinamente y de manera constante durante las últimas décadas. La distorsión en el voltaje de la red ocurre gracias a que el flujo de corrientes armónicas produce caídas de voltaje no lineales en la impedancia de la red, creando niveles de distorsión muy cercanos al límite de compatibilidad de las redes de alimentación pública, y al margen de inmunidad de los equipos electrónicos, incrementando de ésta forma sus posibles fallas[8]. La distorsión armónica concretamente puede causar:

- Mal funcionamiento de aparatos que utilizan la tensión como referencia, ya sea para controlar algunos semiconductores o como base de tiempo para sincronizar ciertos sistemas[8].
- Disturbios debidos a los campos magnéticos generados: líneas de alimentación por las que circulan armónicos pueden inducir corrientes en líneas de transmisión de datos que se encuentren próximas; las corrientes inducidas pueden causar mal funcionamiento de los equipos a los cuales estas líneas de datos están conectadas[8].

- Finalmente, la circulación de corrientes armónicas en el neutro provoca una caída de tensión en éste conductor, lo cual desde el punto de vista eléctrico siempre se debe evitar. Con la presencia de estas corrientes en los sistemas de tierra muchas carcasas de diversos equipos dejan de estar al mismo nivel de potencial, lo que puede interferir en la comunicación entre dispositivos inteligentes; además, la corriente circula por las estructuras metálicas de la construcción convirtiéndose ésta en una antena de campos electromagnéticos perturbadores[8].

1.3.2 Efectos en condensadores

La impedancia de un capacitor disminuye con el aumento de la frecuencia.

Consecuentemente, si la tensión se encuentra distorsionada, corrientes armónicas relativamente altas han de circular por los capacitores destinados a elevar el factor de potencia. Además de esto, la presencia de reactancias en diferentes partes de la instalación trae riesgos de resonancia con los capacitores, lo que puede aumentar considerablemente la amplitud de un armónico en éstos equipos (lo cual empeora la situación en lugar de solucionarla). En la práctica nunca se deben conectar condensadores en instalaciones cuya distorsión armónica total de tensión sea mayor al 8%; en estos sistemas es necesario realizar primero un filtrado de las señales[9].

1.3.3 Efecto en transformadores

El primer efecto de los armónicos presentes en un sistema de potencia sobre los transformadores es el exceso de calor generado por las pérdidas causadas por el contenido armónico de la corriente de carga. Otros problemas incluyen posible resonancia entre la inductancia del transformador y los bancos de capacitores, debilitamiento mecánico del aislamiento (espiras y láminas) debido a la temperatura y posibles vibraciones pequeñas en el núcleo. El calentamiento adicional causado por los armónicos presentes en el sistema reducirá la vida del transformador como resultado de la operación sobre los valores nominales de temperatura[9].

Los componentes primarios de pérdidas en un transformador vienen dados por las pérdidas I^2R en los devanados, las perdidas por corrientes de eddy y las pérdidas por dispersión de flujo electromagnético en áreas tales como los devanados, núcleo, y el tanque. Las pérdidas por corrientes de eddy se incrementan con el cuadrado de la corriente de carga y el cuadrado de la frecuencia[9].

Muchas normas dadas por la IEEE proveen lineamientos para la cargabilidad de los transformadores, estos lineamientos están basados en el límite de la corriente de carga distorsionada de 0.05 en por unidad como consta en la norma IEEE/ANSI C57.12.00-1987 y C57.12.01-1989[9].

La norma IEEE/ANSI C57.110-1986, “IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when Supplying Nonsinoidal Load Currents”, reconoce que las corrientes de carga, en muchos, casos exceden el factor de distorsión de 0,05 por unidad. Estas normas delinean dos métodos para determinar la capacidad del transformador con corrientes de carga no sinusoidales sin pérdida de la expectativa de vida normal. Ambos métodos requieren el conocimiento de las características de las corrientes de carga. El primer método requiere detalles de los datos del diseño del transformador y el segundo método requiere datos certificados en reportes de pruebas[9].

1.3.4 Medidores

Los voltímetros y amperímetros modernos son relativamente inmunes a la influencia de la distorsión de la forma de onda. En dichos medidores, la entrada de voltaje o corriente es procesada usando un multiplexor electrónico. Comúnmente las técnicas de multiplexión usadas son transconductancia variable, log/ antilog, división en el tiempo, térmicos y muestreo digital. Todas estas técnicas pueden ser configuradas para responder a los valores rms del voltaje o la corriente, independientemente de la amplitud o fase de los armónicos.

Resultados de pruebas realizados en voltímetros y amperímetros modernos, usando un troceador para una onda de 60Hz muestran que el error es menor que 0.2% debido a la señal no sinusoidal usada. Los ángulos de disparo usados para recortar la señal original y hacerla no sinusoidal fueron de 0° a 135° para simular aplicaciones comunes. Los

correspondientes valores del factor de distorsión y factor de cresta (CF) se muestran en la Tabla 1.1.

Ángulo de disparo	DF	CF
0	0	1,41
45	0,26	1,48
90	0,65	2
135	1,31	4,69

*Tabla 1.1 Factor de distorsión y factor de cresta para varios ángulos de disparo
Fuente: J. A Garmendia, L I E Morán. "Armónicos en sistemas de potencia"*

En, los instrumentos de medición calibrados inicialmente para medir valores rms absolutos, es decir señales puramente sinusoidales no son aconsejables que se los utilice para la medición en presencia de distorsión armónica. Por ejemplo, con una señal sinusoidal que ha sido segmentada con un ángulo de disparo de 65° , la lectura del valor rms de la señal que está midiendo será 13% menor que el verdadero valor rms.

Los errores en la medida de un vatímetro o un medidor de watt-hora son producidos por la frecuencia, las características de los canales de voltaje y corriente del medidor y por las no linealidades. La linealidad puede verse afectada cuando el factor de potencia es bajo o las formas de onda tienen altos factores de cresta.

En los modernos vatímetros electrónicos la multiplicación de voltaje y la corriente tiene lugar usando división en el tiempo muestreo digital y otras más. Todas estas técnicas son capaces de un excelente rendimiento. En la señal segmentada de prueba a 60Hz, con un ángulo de disparo que varía de 0° a 90° , los errores obtenidos debido a la señal no sinusoidal fue menor que el 0.1%.

Los medidores de watt-hora de disco de inducción son los más comúnmente usados en la medición de energía. Su registro está sujeto a errores debido a las características que dependen de la frecuencia y a las no linealidades. En una prueba usando señales de voltaje y corriente distorsionadas, los errores en los registros pueden llegar a ser tan grandes como

-20% por debajo del valor real con un ángulo de disparo de 90° . Con una onda de voltaje no distorsionada y una onda de corriente distorsionada con el mismo ángulo de disparo de 90° se tiene que los errores en la lectura de la medición son de +5% es decir existe un sobre registro. Las aplicaciones de medidores de inducción deberían ser evitadas en situaciones de gran distorsión de las ondas por presencia de cargas no lineales porque los errores en la lectura de la medición son altos en el rango de 400-1000Hz.

1.3.5 Paneles Eléctricos

En un panel eléctrico las partes más afectadas son la barra de neutros y sus conexiones (debido al exceso de corriente). Un indicio de este fenómeno es la decoloración de estos puntos. La presencia de armónicos afecta a los medidores de energía (kWh) los cuales pueden indicar valores erróneos provocando perjuicios a los consumidores. También interfieren en la respuesta de los relés de protección y provocan una actuación indebida de los disyuntores. Los paneles son contruidos de modo que no sean mecánicamente resonantes a altas frecuencias y, así mismo, una presencia de tales componentes, pueden emitir zumbidos.

1.4 Rendimiento de equipos electrónicos con bajo nivel de THD

1.4.1 Equipo electrónico en general

Existen muchos mecanismos por los cuales la distorsión armónica afecta al equipo electrónico. Múltiples cruces por cero del voltaje como resultado de la distorsión armónica es lo primero a ser considerado. Es común en circuitos electrónicos el uso de cruce por cero del voltaje de la fundamental por diferentes propósitos. Sin embargo, la distorsión armónica que causa más frecuentes cruces por cero que la frecuencia fundamental puede afectar la operación normal del equipo. Un ejemplo cotidiano es en un reloj digital que rápidamente avanza en el tiempo en la presencia de adicionales cruces por cero debido a la distorsión armónica. Cualquier equipo que esté sincronizado a los cruces por cero debería ser considerado como un equipo vulnerable a la distorsión armónica[9].

1.4.2 Equipo doméstico

- **Televisores**

Los armónicos fraccionales y los subarmónicos que afectan al pico del voltaje causan disminución en el tamaño de la imagen y en el brillo de la misma[9].

Los armónicos fraccionales son aquellos que no son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental y los subarmónicos son las frecuencias que están por debajo de la fundamental[9].

- **Lámparas fluorescentes y de Arco de Mercurio**

Si la inductancia y el capacitor entran en resonancia por una de las frecuencias armónicas pueden producir sobrecalentamiento y fallas de operación[9].

- **Computadoras**

Existen límites de fabricación para equipos de computación y procesamiento de datos. Este nivel de armónicas no debe ser mayor que el 5% para computadoras[9].

- **Calidad de energía**

El término calidad de energía eléctrica se emplea para describir la variación del voltaje, corriente y frecuencia en el sistema eléctrico. La pérdida de calidad de energía significa, deterioro de las señales de voltaje y corriente en lo que respecta a la forma de onda, frecuencia e interrupciones que llevan a la reducción o parada de procesos que ocasionan perjuicios.

Se puede observar que la definición de calidad de energía es muy amplia. Pero se puede definir como la ausencia de interrupciones, sobretensiones, deformaciones producidas por armónicos en la red y variaciones de voltaje suministrado al usuario. Además le concierne la estabilidad de voltaje, la frecuencia y la continuidad del servicio eléctrico.

La calidad de la energía se entiende cuando la energía eléctrica es suministrada a los equipos y dispositivos con las características y condiciones adecuadas que les permita mantener su continuidad sin que se afecte su desempeño ni provoque fallas a sus componentes.

1.5 Modelamiento matemático de cargas no lineales conectadas a la red

El bajo costo de los equipos electrónicos de consumo masivo ha llevado a que las cargas típicas de los sistemas de potencia ya no sean de carácter puramente resistivo-inductivo, ya que estos componentes presentan un comportamiento V-I altamente no lineal (de hecho, ésta es la base de operación de los componentes electrónicos). Debido a esto, las señales de corriente y voltaje en los sistemas eléctricos han dejado de ser netamente sinusoidales, circulando por equipos diseñados para señales seno[10].

Con la ayuda de MATLAB y de los datos guardados en programa se realizarán las simulaciones respectivas para encontrar armónicos en la red.

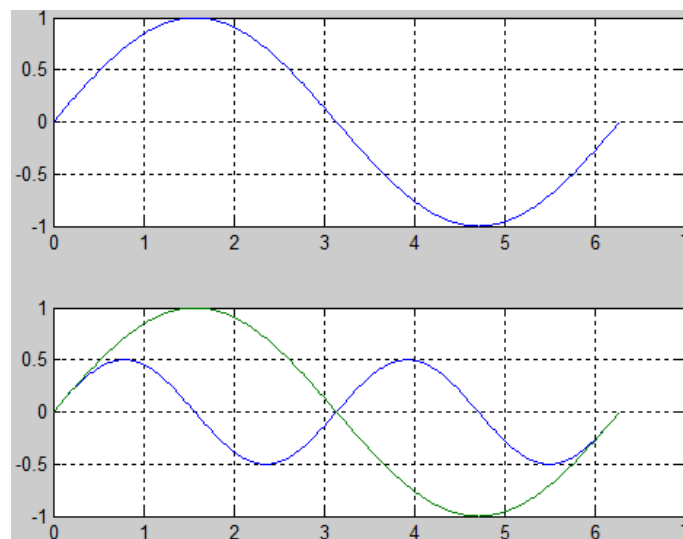


Figura 1.3 Frecuencia fundamental (60Hz) de onda sinusoidal y armónicos; segundo armónico (120 Hz)
Fuente: [Propio del autor]

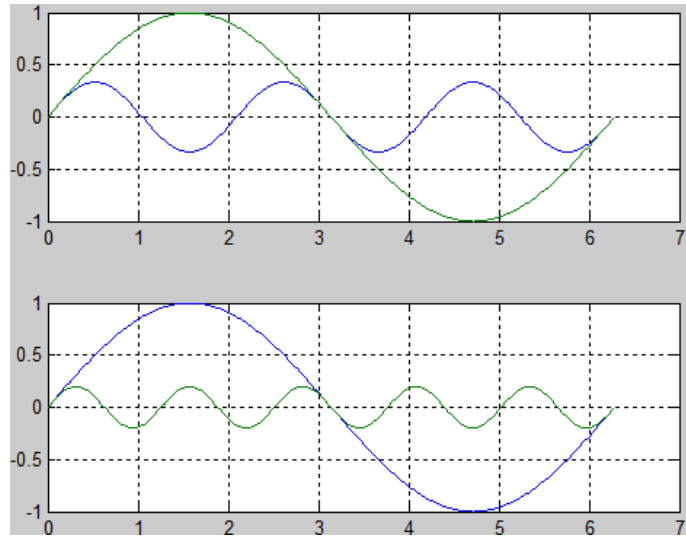


Figura 1.4 Tercer armónico (180Hz) y quinto armónico (300Hz)
Fuente: [Propio del autor]

1.6 Características de curvas de distorsión generadas por diferentes equipos electrónicos

Para cualquier sistema de distribución sea comercial o residencial, la empresa distribuidora brindará un suministro de energía en el cuál la curva característica será:

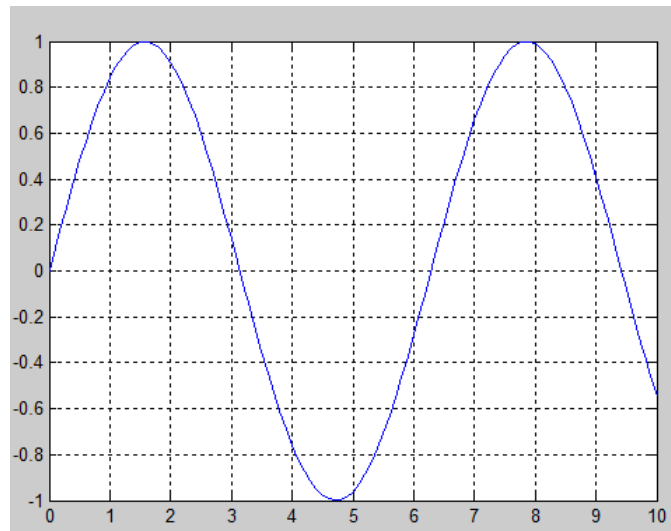


Figura 1.5 Señal de voltaje sin presencia de armónicos
Fuente: [Propio del autor]

La distorsión armónica de la forma de onda de la tensión da lugar a la generación de armónicas (normalmente impares, por ejemplo: 3, 5, 7, etc.). El resultado de tener presentes estas armónicas es que se tiene una elevación de la temperatura normal de operación de

componentes reactivos, podríamos mencionar a capacitores y transformadores, entre otros, acortando por tal razón su vida útil y al mismo tiempo generando también problemas de ruido y energía de radio frecuencia[11].

Por lo antes mencionado, el resultado de manifestarse componentes armónicos diferentes a la onda de corriente fundamental (Fig. 1.3) no se traduce en trabajo, sino que más bien se mira una variación que se convierte en calor. Un incremento del 10% en la intensidad de campo en el dieléctrico de los capacitores debido a las corrientes armónicas normalmente se traduce en un incremento de temperatura de alrededor de 7°C, lo que da por consecuencia una reducción del 30% en la vida esperada del equipo[11].

Para en nivel interno de operación se debe tener en cuenta que en términos generales, todos los equipos de cómputo demandan corriente únicamente en la cresta de la onda de tensión, lo cual da lugar a un aplanamiento o achatamiento Figura 1.4.

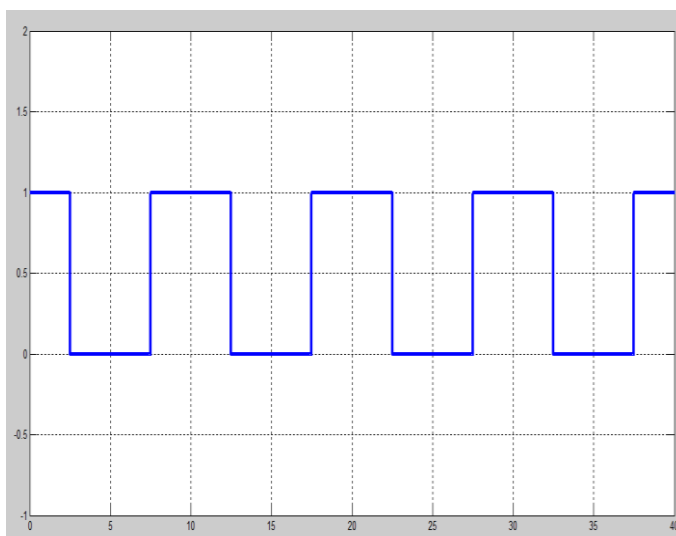


Figura 1.6 Señal de corriente con efecto de una carga no lineal en la red

Fuente: http://www.prolyt.com/archivosprolyt/na_distarmonica.pdf

Por lo tanto, para cargas no lineales el aumento en la distorsión armónica, genera en términos casuales una reducción de la tensión de entrada[11].

Calor eficaz de Tensión (Vca)	Distorsión Armónica	Valor (Ec)*	Tensión a la que la computadora deja de operar (Vca)
120	0%	338,0	96,0
120	3%	310,9	103,8

120	5%	304,4	106,0
120	8%	298,7	108,0
120	10%	291,7	110,5
120	15%	283,7	113,7
120	20%	267,4	No opera
120	25%	255,2	No opera

Tabla 1.2 Efecto de Distorsión Armónica Total en el umbral de operación de una fuente de poder típica de una computadora

Fuente: <http://www.prolyt.com>

Debemos considerar que existen al menos tres situaciones que dan lugar a distorsiones armónicas que deben tomarse en cuenta en cualquier aplicación de equipo electrónico delicado y que son:

- **Operación con plantas de emergencia.-** Las plantas de emergencia son fuentes importantes de distorsión, ya que no están diseñadas para satisfacer los elevados requerimientos de corriente pico repetitivo que demandan los equipos electrónicos delicados[11].
- **Líneas de alimentación muy largas o sobrecargadas.-** El usuario mismo puede distorsionar la forma de onda de alimentación mediante el uso intensivo de equipo de cómputo que se alimente con líneas demasiado largas y/o subestaciones y centros de carga forzados al límite[11].
- **Equipos acondicionadores de línea o sistemas de energía ininterrumpida.-** Existen muchos equipos de protección que introducen una cantidad apreciable de distorsión a la salida en virtud de la característica no lineal de corriente que demandan los equipos electrónicos[11].

Por lo visto en el análisis anterior, tenemos mayor impacto de nivel de la distorsión en equipos electrónicos los cuales son delicados, esta distorsión armónica determinará la vida útil o esperada de cada equipo antes mencionado[11].

La causas debidas para ello son la innecesaria elevación en la temperatura de los componentes conectados a la red (la fuente de los elementos demanda más corriente para mantener la potencia de salida constante) y al efecto joule (I^2R) de las armónicas. Así también obligan al sistema a trabajar más cerca del umbral mínimo de operación[11].

CAPÍTULO II

En el presente capítulo trataremos de los armónicos más característicos que se pueden dar en una red eléctrica residencial, mencionaremos a los armónicos que crean más problemas en la calidad de servicio eléctrico. Además consideraremos las normas de la IEEE en las cuales nos muestran el límite a cumplir en el servicio eléctrico residencial y en un sistema de potencia. Hablaremos de las herramientas matemáticas como son la Serie de Fourier y la simulación por Montecarlo que se usarán para realizar un modelamiento matemático en el cual podamos medir el THD de una residencia así como las gráficas de cada una de las cargas a utilizar. Para finalizar hablaremos del uso de filtros activos que nos permitirá mejorar la distorsión de la onda de corriente y voltaje así como el uso de capacitores para eliminar armónicos.

2. PROBLEMAS QUE GENERAN LOS ARMÓNICOS AL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN

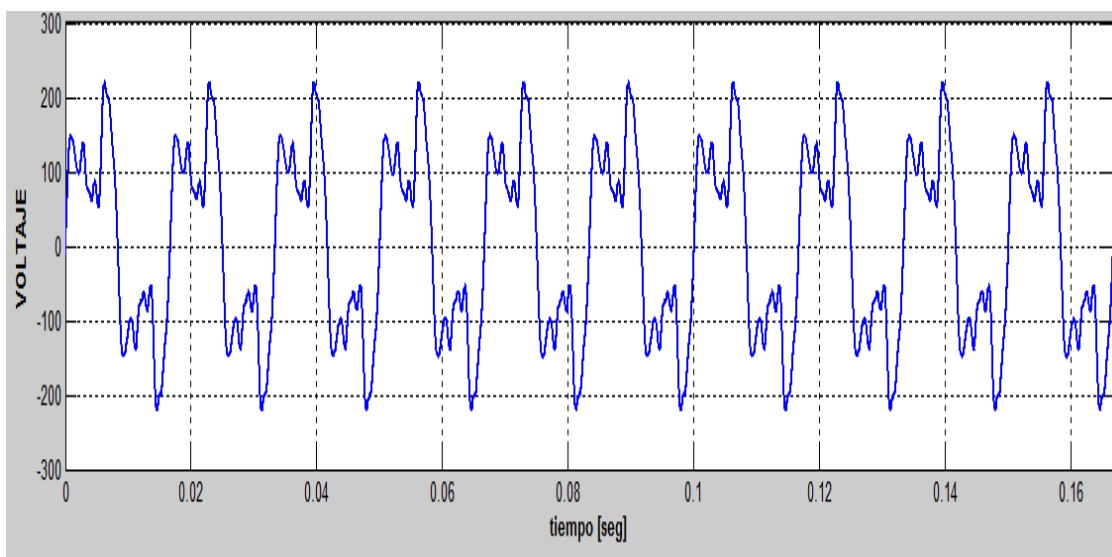
2.1 Armónicos más frecuentes

Existen cargas que pueden ser más susceptibles a la presencia de los armónicos, la mayor susceptibilidad en los equipos se da en que estos asumen una entrada en forma de onda de voltaje sinusoidal. Estos equipos generalmente están presentes en comunicación y procesamiento de datos[4].

De la misma manera, muchas cargas como motores son muy tolerantes a la presencia de armónicos, sin embargo éstos podrían ser dañinos, ya que *“pueden causar el calentamiento dieléctrico, esfuerzo eléctrico, ocasionando de esta manera un envejecimiento prematuro del aislamiento eléctrico”* [21].

Los fabricantes establecen los límites de funcionamiento de sus equipos por debajo de sus valores de falla para tener una operación adecuada y una vida prolongada, pero cuando existen condiciones de resonancia, dichos límites pueden ser excedidos, acelerando su envejecimiento o provocando su falla[12].

“Las corrientes armónicas pueden ocasionar problemas de distorsión, lo cual se refleja en la operación errática de equipo computarizado, sobrecalentamiento de equipo y conductores, falla prematura de equipos, disparo de interruptores” [22].



*Figura 2.1 Señal de voltaje con efecto de una carga no lineal en la red residencial
Fuente: [Propio del autor]*

La magnitud de los costos originados por la operación de sistemas y equipos eléctricos con tensiones y corrientes distorsionadas puede percibirse considerando la reducción de la vida útil de los equipos por sobrecalentamiento producido por las corrientes armónicas[2].

2.1.1 Tipos de armónicos y sus denominaciones

Haciendo un análisis a las causas de la distorsión armónica podemos encontrar dos tipos de armónicos: Armónicos característicos o normales y Armónicos no característicos anormales o no usuales.

La causa del primero es por la linealidad de elementos eléctricos o electrónicos conectados en un sistema balanceado y, por otra parte el segundo es debido a algunas causas diferentes como: desbalances en el sistema trifásico o periodos transitorios [10].

Dados los armónicos que tiene por frecuencia múltiplos enteros de tres ($h= 3, 6, 9, 12, \dots$), a estos se los puede llamar armónicos triples y los demás se denominan armónicos no

triples.

Mientras que los armónicos, cuyas frecuencias son múltiplos de dos ($h = 2, 4, 6, 8, 10, \dots$), reciben el nombre de armónicos pares, los demás toman el nombre de armónicos impares[10].

Además se definen los armónicos no fluctuantes o cuasi estacionarios y los armónicos fluctuantes, estos últimos se diferencian de los primeros en el sentido de que sus valores cambian con el tiempo de acuerdo a la variación de la carga[3].

2.1.2 Límites de distorsión armónica

Se limitan, para una distribución de energía eléctrica normal, los valores admisibles del contenido de armónicos. Las normas de vigente aplicación son:

- **UNE 21248/6-1996.**

El contenido de armónicos H en porcentaje (equivalente al TDH-F definido en la literatura anglosajona), se define según su apartado 2 como:

$$H\% = 100 \sqrt{\sum_{n=2}^{n=N} \left(\frac{I_n^2}{I_1^2} \right)} \quad (2.1)$$

Donde:

I_1 es la componente fundamental de la corriente (de frecuencia 60 Hz)

I_N es el armónico enésimo de la corriente.

N es el máximo orden de armónico a considerar. La norma no especifica este número.

Algunos fabricantes consideran hasta el armónico 15, otros hasta el 25 e incluso hay quienes toman hasta el 50.

Los valores admisibles para el contenido de armónicos total y de orden par de la corriente de carga se limitan al 5% y 10% respectivamente[4].

- **CEI 555**

La norma indica como límites los valores de la tabla.

Armonico impar (n)	Clase A (A)	Clase D absoluto (A)	Clase D relativo (mA/W)
3	2,30	1,08	3,6
5	1,14	0,60	2,0
7	0,77	0,45	1,5
9	0,44	0,30	1,0
11	0,33	0,18	0,6
13	0,21	0,15	0,51
15 al 39	0,15 x (8/n)	0,18 x (11/n)	0,2 x (11/n)

Tabla 2.1 Límites de corrientes armónicas Impares. CEI 555

Fuente: Rodríguez Cortés Pedro, “Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Enero 2005.

Armonico impar (n)	Clase A (A)	Clase D absoluto (A)	Clase D relativo (mA/W)
2	1,08	0,3	1
4	0,43	0,15	0,5
6	0,3	-	-
8 al 40	0,23 x (8/n)	-	-

Tabla 2.2 Límites de corrientes armónicas Pares. CEI 555

Fuente: Rodríguez Cortés Pedro, “Aportaciones a los acondicionadores activos de corriente en derivación para redes trifásicas de cuatro hilos”, Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Catalunya, Barcelona, Enero 2005

- **IEEE 519 – 1992**

Esta norma, originaria de Estados Unidos, resulta más generalista y didáctica que las anteriormente expuestas, y ofrece abundante información acerca de las causas y efectos de las perturbaciones armónicas en sistemas de potencia. La filosofía que subyace detrás de este estándar busca, por un lado, limitar la inyección de corrientes armónicas por parte de los consumidores individuales para que no creen unos niveles inaceptables de distorsión en

la tensión del sistema de potencia en condiciones normales de funcionamiento, y por otro, acotar la distorsión armónica de la tensión ofrecida por la compañía suministradora[13].

En esta norma, al igual que ocurría en la IEC 61000-3-4, los límites de inyección de corriente armónica en el PCC se fijan en función de la relación entre la potencia de la carga y la potencia de cortocircuito en el punto de acoplo. A continuación se muestran las definiciones de interés utilizadas en la IEEE 519-1992 para determinar estos límites[13].

✓ **Tasa de distorsión en la demanda (TDD – Total Demand Distortion):**

$$T_{DD} = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\max}} I_h^2}}{I_L} \quad (2.2)$$

En esta expresión, I_L es la máxima corriente de frecuencia fundamental demanda por la carga (durante 15 o 30 minutos) en el PCC, y se calcula a partir de la media de los máximos en la corriente demandada durante los últimos 12 meses. De igual manera, h_{\max} indica el orden armónico máximo que debe ser considerado en los cálculos. La única referencia que existe en la norma acerca de este valor especifica que $h_{\max} = 50$ [5].

✓ **Relación de cortocircuito (R_{sc} – Short-circuit ratio):**

$$R_{sc} = \frac{I_{sc}}{I_L} \quad (2.3)$$

Donde:

$$I_{sc} = \frac{S_{sc}}{\sqrt{3} U_{nom}} = \frac{U_{nom}}{\sqrt{3} Z} \quad (2.4)$$

Siendo U_{nom} es la tensión nominal de línea a línea y Z la impedancia de la red en el PCC.

De manera general, el objetivo de esta norma es limitar la inyección de corrientes armónicas para que la tensión en el PCC no presente ningún armónico individual con una amplitud superior a un 3% de la componente fundamental, y que globalmente, el THD de tensión no sea superior al 5% en sistemas en los que no existe una resonancia paralelo a una frecuencia específica[13].

En la Tabla siguiente se muestran los límites de inyección de corriente armónica especificados en la IEEE 519-1992.

Sistemas de distribución (120V – 69kV)						
Tasa individual admisible en relación a I_L (%)						
I_{sc} / I_L	$h < 11$	$11 \leq h \leq 17$	$17 \leq h \leq 23$	$23 \leq h \leq 35$	$35 \leq h$	TDD (%)
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0 %
20 – 50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0 %
50 – 100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0 %
100 – 1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0 %
> 1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20. %

Tabla 2.3 Límites de corrientes armónicas en punto de acoplamiento común.

Fuente: NORMA IEEE 519 - 1992, “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia”, p. 30

I_{sc} = corriente de cortocircuito disponible en el punto de acoplamiento común.

I_L = máxima corriente fundamental demandada.

TDD = Distorsión total de demanda.

- **Límites de Distorsión de Corriente IEEE-519**

I_{sc} / I_L	TDD (Distorsión total de Demanda)
< 20	5 %
$20 < 50$	8 %
$50 < 100$	12 %
$100 < 1000$	15 %
> 1000	20 %

Tabla 2.4. Límites de Distorsión de corriente

Fuente: NORMA IEEE 519 - 1992, “Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia”, p. 30

Dónde:

I_{sc} = corriente corto circuito

I_L = corriente de carga

- **Límites de la distorsión del voltaje IEEE-519**

- Usos especiales (hospitales, aeropuertos) el 3%
- Usos generales de los sistemas el 5%
- Sistemas dedicados (carga convertida 100%) 10%

2.2 Armónicos que generan los equipos eléctricos y electrónicos

En la actualidad en una vivienda residencial, existen varias corrientes o tensiones armónicas. Se afirma incluso que la tensión de distribución de UTE tiene una cierta componente armónica, ciertos tipos de iluminación fluorescente, las fuentes de alimentación de las computadoras y los cargadores de baterías, entre otros, producen corrientes armónicas en nuestra instalación[4].

“Las cargas no lineales como los focos ahorradores, fuentes rectificadoras, entre otros, cambian la naturaleza de la onda sinusoidal de la corriente de alimentación AC, esto produce un flujo de corrientes armónicas que son introducidas al sistema de distribución, lo que puede causar interferencia con circuitos de comunicación y con otros equipos principalmente electrónicos, esta interferencia también se puede producir en las residencias” [23].

Actualmente en los sistemas de distribución se utiliza comúnmente la compensación de potencia reactiva con capacitores para mejorar el factor de potencia, por lo cual existe la probabilidad de la ocurrencia de resonancia con los armónicos que las cargas no lineales introducen al sistema eléctrico, esto produce una gran distorsión de la forma de onda de la tensión y de la corriente[2].

- **Corrientes no sinusoidales**

Hace varios años atrás, no era muy común hablar de corrientes armónicas, en la mayoría de los casos se relacionaba el término a la industrias que tenían instalados hornos de arco

industrial o rectificador de potencia, como el caso de las centrales telefónicas. Con el avance de la electrónica de potencia, la cantidad de equipos que generan armónicas es cada vez mayor[12].

Entonces, de acuerdo con lo que se dijo anteriormente, al encender cualquier artefacto de uso eléctrico, este consumirá una corriente sinusoidal, esto será muy poco probable.

Considerando a la carga eléctrica, si esta consume una corriente sinusoidal al estar conectada a una alimentación eléctrica del mismo tipo, se indica que la carga tiene un comportamiento lineal respecto a la tensión de trabajo, o simplemente que es una carga lineal[7].

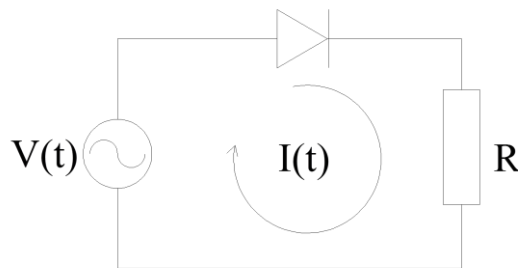
Esto es, la relación entre la corriente y la tensión es la forma

$$I(t) = a \cdot V(t) \quad (2.5)$$

En donde a es una constante independiente del tiempo, $I(t)$ la corriente y $V(t)$ la tensión.

En otras palabras, la corriente es proporcional al voltaje.

Pero esto no es siempre se cumple. Si bien la corriente se consume desde una diferencia de potencial que varía a lo largo del tiempo con una forma sinusoidal, la corriente no tiene por ser así. En estos casos diremos que las cargas son lineales o no-lineales[12].



*Figura 2.2 Puente rectificador de media onda
Fuente: www.electromagazine.com*

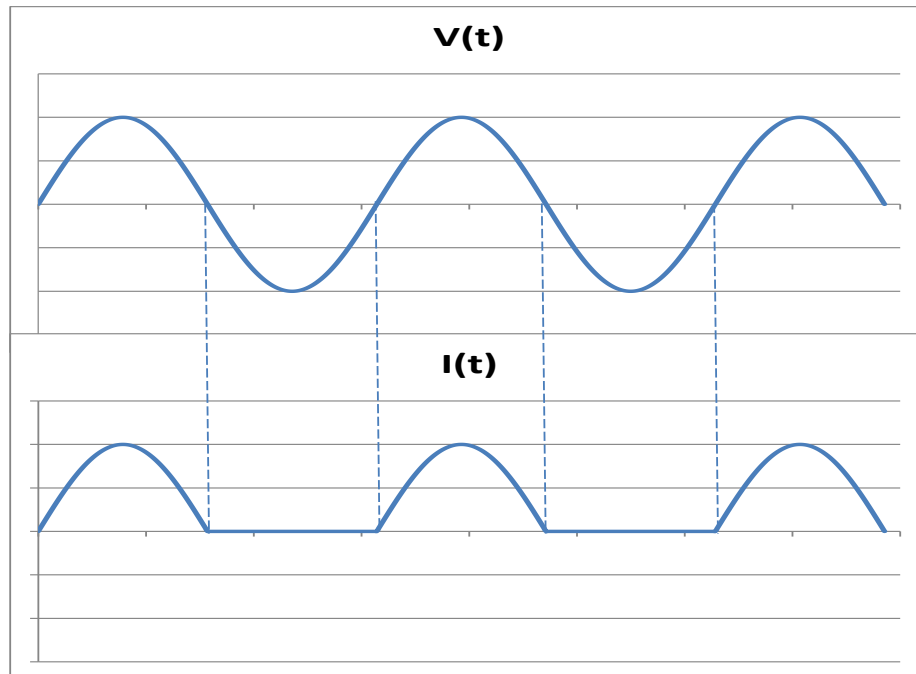


Figura 2.3 Gráficas de voltaje y corriente del rectificador de media onda
Fuente: [Propio del autor]

Este es el circuito de un puente rectificador de media onda. De no existir el diodo en el circuito, la corriente del circuito sí sería sinusoidal, pero su existencia impide que la corriente tome los valores de la semisinusoide debajo del eje horizontal[12].

Esto hace que la corriente no sea totalmente sinusoidal.

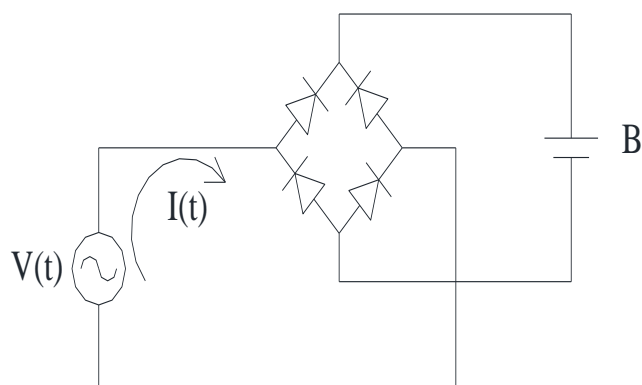


Figura 2.4 Circuito básico cargador de batería
Fuente: www.electromagazine.com

Este circuito es el de un sencillo cargador de baterías. La figura muestra que la corriente circula cuando la tensión a la salida del puente de 4 diodos supera a la de la batería

(corriente que va cargando a la batería)[12].

De esta forma, la corriente que se consume es tal cuál se muestra en la figura. Como se puede apreciar esta corriente tampoco es sinusoidal (este tipo de corriente también se encuentra en las fuentes de las computadoras, televisores [8]).

2.2.1 Fuentes Armónicas

✓ Convertidores

Podemos decir que los convertidores son dispositivos que inyectan armónicas a los sistemas de corriente alterna debido a la operación de los elementos de switcheo (tiristores).

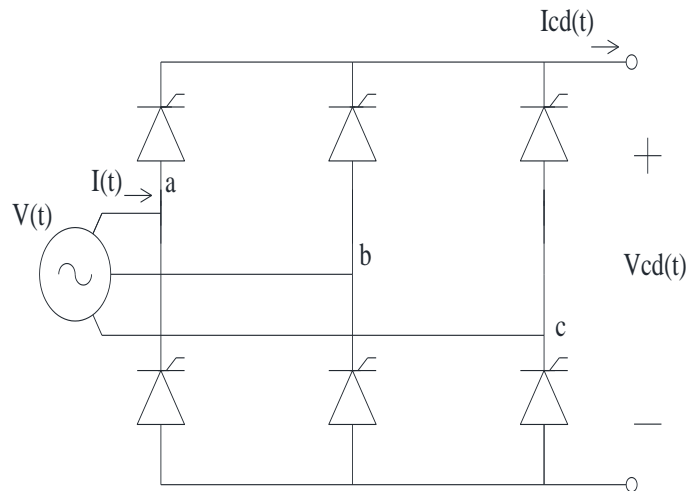


Figura 2.5 Cargador de batería usando tiristores
Fuente: www.cursos.cl/ingenieria/2011.com

El índice de generación de armónicas en este caso depende de la operación del propio rectificador y de la carga que este alimenta.

✓ Hornos de Inducción

El horno de inducción consiste en un rectificador e inversor, el cual controla la frecuencia de alimentación de una bobina. De esta forma la bobina mediante inducción provoca que las piezas metálicas se calienten (como si fueran el núcleo de la bobina) las mismas que alcanzan temperaturas muy altas y después pasan a ser moldeadas[10].

✓ **Compensadores estáticos de Potencia**

Los compensadores estáticos emplean tiristores para controlar la potencia reactiva. Estos son utilizados para el control de potencia reactiva y de igual forma para el control de voltaje en las redes de transmisión principalmente[14].

Como se puede observar en la Figura 2.4, el TCR inyecta diferentes armónicas dependiendo del ángulo de disparo, algunas armónicas (múltiplos de tres) se pueden eliminar si se tiene un TCR trifásico conectado en triángulo.

✓ **Hornos de arco eléctrico**

Este tipo de horno es utilizado para la fundición del acero, para llevar a cabo dicho proceso se utilizan electrodos los cuales al hacer contacto con el acero crean un arco eléctrico de tal capacidad que funde el acero.

Por esta razón, los hornos de arco eléctrico son cargas que no se encuentran en estado estable[10].

✓ **Saturación de transformadores**

La saturación de transformadores produce la generación de una señal armónicas, pues al ser un elemento no lineal, las armónicas generadas por la saturación son las armónicas impares, principalmente la tercera. La generación de estas armónicas surge en estado estable para cuando el transformador está sobrecargado, lo que produce que el transformador opere en su región no lineal. Otra de las maneras más frecuentes de la generación de armónicas en el transformador es en el momento de su energización. Mientras se produce este fenómeno transitorio de la energización, el transformador presenta gran cantidad de armónicas pares e impares y esto puede transcurrir por algunos minutos[14].

✓ **Lámparas Fluorescentes**

En la actualidad la utilización de lámparas fluorescentes aumentado notablemente como una solución para reducir el consumo de energía, en muchos lugares del mundo. Se busca desarrollar nuevas tecnologías como es el diseños de lámparas fluorescentes y lámparas de vapor de metal, estos sistemas son considerados los más eficientes en iluminación. No obstante se debe considerar el aspecto negativo del uso masivo de lámparas fluorescentes debido a que generan corrientes armónicas[3].

Las lámparas incandescentes al ser lineales, provocan la circulación de corriente fundamental al ser alimentadas por una fuente de voltaje senoidal con la misma frecuencia.

Al contrario las lámparas fluorescentes son de carga no lineales por naturaleza, por lo tanto al administrar un voltaje senoidal, se produce una circulación de corrientes no sinusoidales a través de ellas. Debido a que las lámparas fluorescentes de alta eficacia se conectan a la red de distribución, las corrientes armónicas que se producen pueden influir a través de los conductores hacia los transformadores en el sistema de distribución[15].

✓ **Equipo de computo**

De forma general el equipo de oficina, como el equipo de cómputo funcionan en base a una fuente de alimentación la misma que es un puente rectificador ya que tiene la particularidad natural de producir frecuencias armónicas[10].

✓ **Equipo doméstico**

En su gran mayoría los electrodomésticos utilizan para su funcionamiento gran cantidad de dispositivos electrónicos los cuales por sus propiedades de alimentación son considerados como cargas no lineales, en consecuencia son fuentes de corrientes armónicas[14].

✓ **Nuevas fuentes de armónicas**

Existen algunas otras fuentes de distorsión armónica como son los inversores y rectificadores con control de ángulo de fase[3].

✓ **Futuras fuentes de armónicas**

A futuro, se prevé el aumento considerable de corrientes armónicas en redes eléctricas, debido al elevado uso de autos eléctricos que necesitaran recargar sus baterías en grandes sitios de abastecimiento[14].

Otras posibles fuentes de armónicas son aquellas que requerirán la conversión de grandes volúmenes de energía, posiblemente producidas por fuentes no convencionales (Eólica, Solar, etcétera), el uso de ciclo-convertidores para la operación de máquinas de baja velocidad y alto par, el uso de dispositivos de conversión directa de energía como baterías de almacenamiento y celdas de combustible[14].

2.3 Formulación para determinar armónicos en la red

La energía eléctrica se distribuye de manera trifásica a través de un sistema trifásico sinusoidal. Uno de los parámetros del sistema es la forma de la onda, que debe ser lo más parecida posible a una onda netamente sinusoidal. Es necesario hacer un análisis de la forma distorsionada de esta onda[8].

La generación de corrientes armónicas se caracteriza en una parte teórica, es decir, su representación matemática, esto se puede apreciar a través de la teoría matemática llamada Series de Fourier[8].

2.3.1 La serie trigonométrica de Fourier

J.B.J. Fourier (1758-1830) fue un matemático francés que al estudiar los problemas del flujo del calor (las aplicaciones eléctricas eran escasas en 1822), demostró que las funciones periódicas arbitrarias podrían ser demostradas mediante una serie infinita de senoides de frecuencias armónicamente relacionadas[10].

En una representación de serie de Fourier de una señal, los senos y los cosenos de más alta frecuencia tienen frecuencias que son múltiplos enteros de la frecuencia fundamental[10].

El múltiplo recibe el nombre de número u orden armónico y se le designará mediante n. Existen un gran número de formas de onda de voltaje y de corriente, los cuales pueden describirse mediante una sola ecuación[8]:

$$f(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (2.1)$$

La cual podemos desarrollar de la forma:

$$f(t) = a_0 + a_1 \cos(\omega t) + a_2 \cos(2\omega t) + \dots + a_n \cos(n\omega t) + b_1 \sin(\omega t) + b_2 \sin(2\omega t) + \dots + b_n \sin(n\omega t) \quad (2.2)$$

Donde:

a_0, a_1, \dots, a_n y b_0, b_1, \dots, b_n son constantes conocidas como coeficientes de Fourier

$$\omega = 2\pi f_0 \text{ es la frecuencia angular en rad/s} \quad (2.3)$$

Algunos tipos de onda pueden detallarse en términos de funciones matemáticas conocidas como trigonométricas, función rampa, función escalón. No obstante, su análisis no nos indica nada, al menos en forma directa, del contenido de frecuencia de tales formas de onda, sino que sólo nos brinda información directa en el dominio del tiempo[16].

Esta sería la razón principal por la cual la serie de Fourier tiene gran importancia, debido

a que por su medio pueden describirse cualquier función periódica no senoidal como una serie infinita de términos senoidales de frecuencias armónicamente relacionadas[8].

De tal forma que una onda periódica puede describirse de acuerdo con su frecuencia fundamental, su segunda armónica, su tercera armónica, y cada una de estas frecuencias se relaciona simplemente con el período T [5].

De esta manera, se accede al análisis en el dominio de la frecuencia y se facilita la comprensión de los fenómenos físicos que ocurren en aquellas redes eléctricas energizadas con voltajes no senoidales. En Figura No. 1, se presenta un tren de ondas completas senoidales (que se llaman rectificadas de onda completa) y la figura No. 2 una señal periódica continua (pero irreconocible), las cuales pueden ser descritas fielmente por medio de la serie de Fourier[4].

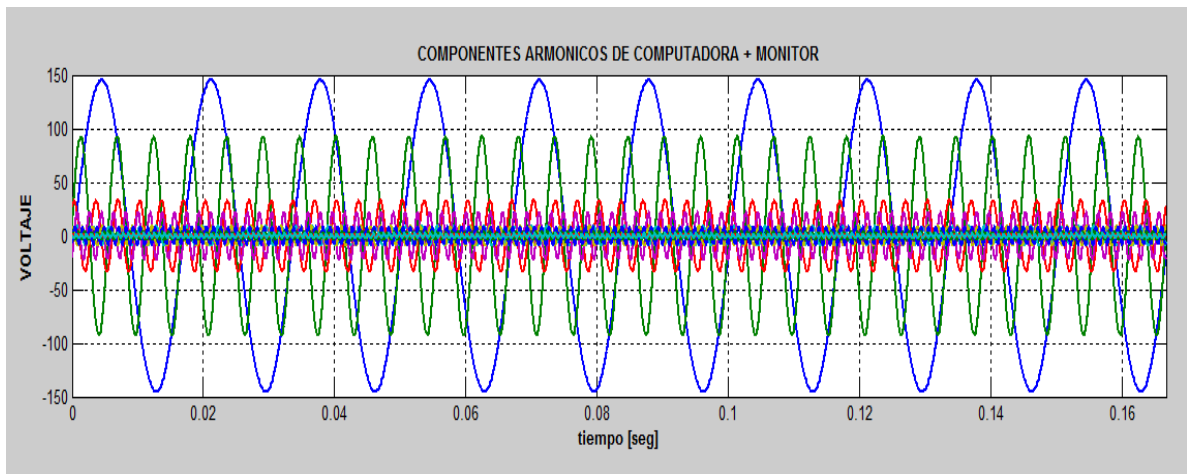


Figura 2.6 Ondas de voltaje generadas con cada señal de armónico de la Serie de Fourier
Fuente: [Propio del autor]

2.3.2 Filtrado de series de Fourier

Si se desea obtener la función de la tensión o la corriente de salida en un sistema lineal en término de series de Fourier y sabemos de antemano que la entrada es una señal periódica no lineal. Utilizando la serie de Fourier para descomponer la señal de entrada y poder apreciar sus componentes sinusoidales, podemos hacer pasar separadamente cada

componente a través del sistema. Por superposición, sabemos que la señal de salida total es la suma de todas las salidas de las componentes sinusoidales[16].

Esta onda de salida total es la salida estacionaria debido a la señal de entrada no sinusoidal. Es la respuesta particular del sistema debido a la señal de entrada no sinusoidal, es decir, esta entrada ha sido previamente excitada durante un tiempo suficiente para que haya desaparecido rastro de respuesta transitoria alguna, que es la respuesta natural de las condiciones de iniciales, antes de aplicar la señal de entrada[16].

Para esto se necesita un filtro pasa-bajo ideal, que tiene una función de transferencia $H(jw)$ de las siguientes características.

$$H(jw) = 0 \quad (2.4)$$

$$H(jw) = \begin{cases} 1 & -w_c \leq w \leq W_c \\ 0 & \text{otros valores} \end{cases} \quad (2.5)$$

Esto quiere decir que si una señal periódica no sinusoidal se aplica al filtro, la salida estará formada por las componentes sinusoidales de Fourier aplicadas a la entrada cuya frecuencia angular sea inferior a w_c .

Necesariamente para que una onda periódica de forma no sinusoidal pase sin distorsión armónica a través de un sistema lineal, llamada transmisión sin distorsión, cualquier desplazamiento de fase introducido por el sistema debe ser proporcional número del armónico, es decir, a la frecuencia. Por lo que es necesario que el ángulo de la función de transferencia al sistema $H(jw)$, sea una función lineal de la frecuencia[16].

Dada una función periódica, se desea obtener una serie aproximada utilizando sólo un número finito de n términos armónicos. Se designa esta aproximación de n términos por $f_n(t)$.

$$f_n(t) = \sum_{k=-n}^n a_k e^{j n \omega_0 t} \quad (2.6)$$

Donde el valor numérico tiene que ser calculado. Si para evaluar los términos de la ecuación, tomamos específicamente:

$$a_k = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) e^{-j n \omega_0 t} dt \quad (2.7)$$

Lo que podemos llamar a nuestra aproximación serie de Fourier truncada.

En cualquier instante de tiempo, la diferencia entre una aproximación $f(t)_n$ y la onda real es $f(t)$ el error en $e_n(t) = f(t) - f_n(t)$

Este error puede ser positivo o negativo. Para dar una medida de mayor calidad en la aproximación se elegirá el error cuadrático medio, dado por:

$$e_n^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} e_n^2(t) dt \quad (2.8)$$

Desarrollando

$$e_n^2 = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [f(t) - f_n(t)]^2 dt = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} [f(t) - \sum_{k=-n}^n a_k e^{j n \omega_0 t}]^2 dt \quad (2.9)$$

Como podemos suponer, cuantos más armónicos tomemos en la serie; mayor será a aproximación y, en consecuencia, menor será el error. Sin embargo, aun utilizando un número infinito de términos, si la función tiene alguna discontinuidad. Nunca podremos lograr una réplica perfecta de la original $f(t)$ [8].

2.3.3 Espectro de onda

El espectro correspondiente a cada onda se representa mediante un diagrama que nos indica específicamente y detalla la amplitud de cada uno de los armónicos y ángulos de desfase relativos a cada uno de los componentes sinusoidales que constituyen una onda llamada espectro de la onda. La amplitud de cada uno de los armónicos decrece muy rápidamente; por consiguiente para producir una onda con un gran número de armónicos se necesitará mayor número de términos para desarrollar la serie. El número de términos y

amplitudes de la onda son características propias de cada onda y no cambian, sea cual sea el método de análisis[16].

2.3.4 Mitigación de los armónicos por corriente

Existe alteración en la corriente armónica, en mayor o menor medida, en todos los sistemas de potencia. Comúnmente, los armónicos de corriente deben ser controlados sólo cuando éstos llegan a provocar problemas. Las causas más comunes que hacen problemática la circulación de armónicos de corriente son:

- 1.** La fuente de generación de corrientes armónicas es demasiado grande[13].
- 2.** El PCC de la carga está lejano, con lo que el camino seguido por los armónicos de corriente es demasiado largo. Este problema se agrava cuando la línea de suministro es débil, presentando una elevada impedancia aguas arriba del PCC. De esta manera, la circulación de los armónicos de corriente crean una elevada distorsión en la tensión del sistema, e interfiere sobre los sistemas de comunicaciones[13].
- 3.** La respuesta del sistema de potencia a uno o varios de los armónicos inyectados da lugar a situaciones de resonancia. En este caso, las tensiones o corrientes armónicas se ven ampliadas, alcanzando niveles superiores a los límites tolerables[13].

Las alternativas básicas para controlar la circulación de corrientes armónicas son:

- 1.** Modificar la respuesta frecuencial del sistema de potencia.
- 2.** Reducir las corrientes armónicas generadas por la carga.
- 3.** Añadir filtros que permitan derivar o bloquear los armónicos de corriente.

Seguidamente se comenta con cierto grado de detalle cada una de estas opciones.

2.3.4.1 Modificar la respuesta frecuencial del sistema de Potencia

Las medidas frecuentemente adoptadas para cambiar la respuesta adversa del sistema de potencia ante los armónicos son:

a) Implementar inductancias en serie con los condensadores de los bancos de compensación de potencia reactiva para que la frecuencia de resonancia no coincida con ninguno de los armónicos presentes en el sistema[12].

b) Modificar la capacidad del condensador de los bancos de compensación de potencia reactiva. Generalmente esta es la solución más barata tanto para consumos industriales como domésticos y de servicios[13].

c) Modificar de lugar la batería de condensadores a otro punto del sistema de potencia donde la impedancia de cortocircuito sea diferente, o donde existan mayores pérdidas, lo cual dará lugar a un mayor coeficiente de amortiguamiento. Esta alternativa no suele ser eficaz para consumidores industriales, puesto que la batería de condensadores no se puede distanciar lo necesario como para apreciar cambios notables.[13].

d) Incorpora filtros pasivos paralelos para modificar la respuesta frecuencial del sistema. Cabe señalar que en la actualidad existen múltiples filtros pasivos en sistemas complejos que puede dar lugar a la aparición de resonancias anómalas, que posteriormente empeoren el comportamiento del sistema[13].

e) Eliminar algunas baterías de condensadores. Esta alternativa es realizable cuando se reconoce que el incremento de las pérdidas, la bajada en la tensión de la red, y la penalización en el factor de potencia, son efectos aceptables como consecuencia en la búsqueda de soluciones para resolver el problema de la resonancia armónica en el sistema de potencia[13].

2.3.4.2 Reducir las corrientes armónicas generadas por la carga

Para poder modificar la distribución armónica de la carga, se representará un diagrama de tres cargas distorsionantes monofásicas conectadas entre fase y neutro, esto dará como consecuencia una composición armónica trifásica muy heterogénea[14].

Una elevada inductancia en el lado de continua, forma parte de este rectificador. Un rectificador con un gran condensador en el lado de continua, el cual se puede tratar como una fuente de tensión distorsionante. Y un regulador de una lámpara incandescente basado en un triac (dimmer), el cual se puede considerar como una gran carga resistiva no lineal[14].

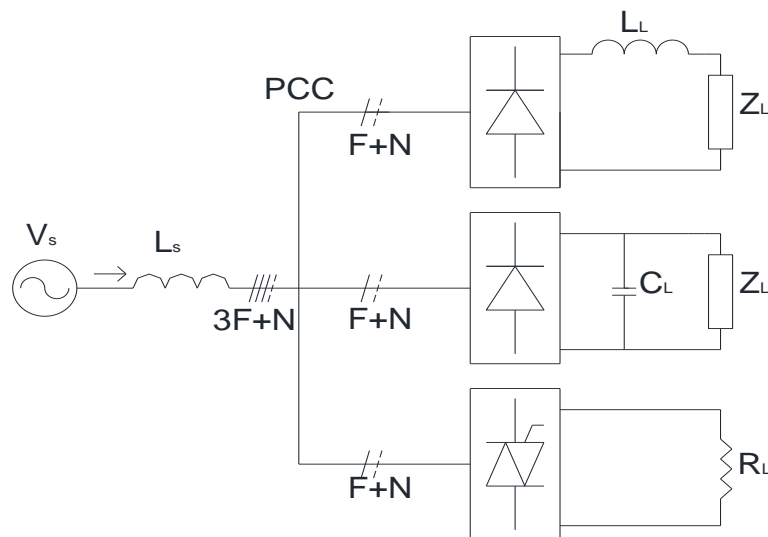


Figura 2.7 Composición de cargas en una situación genérica
Fuente: Rodríguez Cortez, "Análisis de circuitos con cargas no lineales"

Las alternativas adoptadas para modificar la corriente solicitada por estas cargas son:

i) Conectar inductancias limitadoras en el lado de alterna en los convertidores. Esta solución puede resultar quizás la más fácil e incluso la más económica sin embargo su eficacia es limitada, necesitándose inductancias de grandes dimensiones, y aumentando las caídas de tensión en las líneas.

En la figura 2.8 se puede apreciar el cambio muy notorio con respecto al original de las corrientes de la impedancia de la línea y como las corrientes en el PCC han sido mejoradas.

Pero hay que notar que en el rectificador con carga inductiva, el aumento de la impedancia de la línea da lugar que se alarguen los tiempos de conmutación de la corriente entre las diferentes ramas del convertidor.

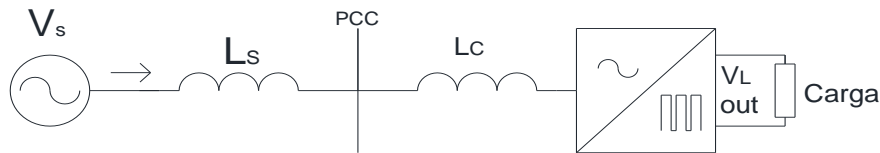


Figura 2.8 Inserción de una inductancia limitadora en el lado de alterna
Fuente: Rodríguez Cortez, “Análisis de circuitos con cargas no lineales”

ii) Alimentar la carga mediante un transformador con el primario en triángulo. Con esta medida lo que se busca es impedir la circulación de corrientes homopolares en el lado del primario del transformador. Si las corrientes consumidas por las cargas no lineales estuviesen perfectamente equilibradas, esta solución eliminaría la circulación de armónicos múltiplos del 3 por el lado de la fuente[13].

Un montaje clásico, que se basa en “encerrar” los armónicos homopolares en el primario del transformador (conectado en triángulo), consiste en la eliminación de dos puentes rectificadores trifásicos de igual potencia mediante un transformador con dos devanados secundarios, uno en estrella y el otro en triángulo. Esta disposición produce un desfase de 30° entre las tensiones de los dos secundarios del transformador. Los armónicos de orden impar con h impar son los primeros en eliminarse por la restricción de la materia[13].

Los primeros armónicos que se van a eliminar son el 5° y el 7° por su elevada valoración de su amplitud.

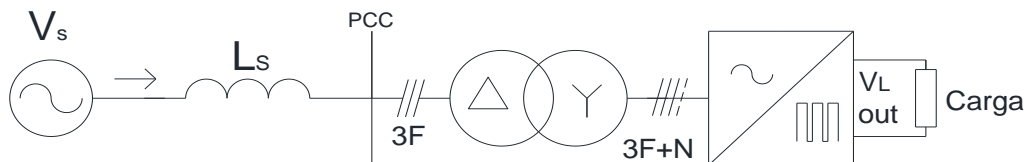


Figura 2.9 Inserción de un transformador (triángulo – estrella)
Fuente: Rodríguez Cortez, “Análisis de circuitos con cargas no lineales”

Los primeros armónicos que aparecerían en el lado de primario serían el 11° y el 13° . Esta solución se usa mucho en rectificadores de alta potencia, donde se aumenta el número de

rectificadores y devanados secundarios, con su adecuado desfase relativo, llegándose a montajes de hasta 72 fases, como los utilizados en aplicaciones de electrolisis[13].

iii) Insertar una reactancia en zig-zag en paralelo con la carga trifásica. La reactancia en zig-zag, muestra una impedancia muy baja ante componentes homopolares, coincidente con la inductancia de dispersión de las bobinas, y una impedancia elevada ante componentes de secuencia positiva y negativa. Por lo tanto, la conexión de esta reactancia en paralelo con la carga ofrece un camino de baja impedancia a las corrientes homopolares solicitadas por ésta, con lo que la corriente de neutro aguas arriba en su punto de conexión se verá fuertemente atenuada. Lógicamente la reactancia en zig- zag cancelará la circulación de armónicos en el lado de fuente[13].

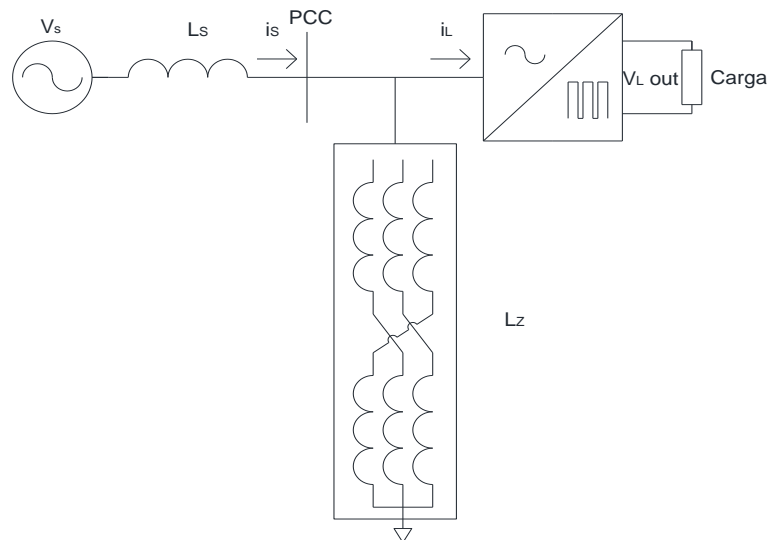


Figura 2.10 Inserción de una carga en zig – zag en paralelo con la carga
Fuente: Rodríguez Cortez, “Análisis de circuitos con cargas no lineales”

En este caso, debido al gran desequilibrio existente en las corrientes solicitadas por dichas cargas, los armónicos con índice $3h$ no se cancelarán en el lado de fuente, aunque si es cierto que la corriente que circula por el conductor de neutro es prácticamente nula[16].

iv) adaptar una instalación. Esta alternativa realmente no modifica la corriente solicitada por las cargas, sin embargo permite que el sistema soporte la circulación de los armónicos de corriente. De esta alternativa se derivan otras posibles soluciones como son: la utilización de conductores con neutros separados para cada fase, el sobredimensionamiento del

conductor de neutro, el cambio de tomas en los transformadores en función del contenido armónico de la corriente (desclasificación del conductor)[8].

2.3.4.3 Utilización de filtros de armónicos

Los filtros de armónicos se pueden definir como un dispositivo que presenta una severa variación de su impedancia en función de la frecuencia. Lógicamente la inserción de estos dispositivos en el sistema de potencia modificará la respuesta frecuencial del mismo, con lo que podrá alterar el camino de circulación de los armónicos de corriente. En base a esta concepción, los filtros de armónicos se podrán clasificar en dos categorías[13]:

- ✓ Filtro paralelo, que presentará baja impedancia en un determinado rango de frecuencias. La conexión de este tipo de filtros en paralelo con la carga permitirá establecer un camino de baja impedancia para los armónicos de corriente seleccionados, evitándose así que estos fluyan por el lado de fuente.
- ✓ Filtros serie, que son complementarios a filtros anteriores, y ofrecen alta impedancia a determinadas frecuencias. La conexión de este tipo de filtros en serie con la carga aumentará la impedancia que ofrece el sistema a los armónicos seleccionados, con lo que su amplitud se verá atenuada.

Cada uno de estos filtros presenta un campo de aplicación específico, como se muestra en la figura 2.12, cuando la carga no lineal tiende imponer la corriente solicitada de la red (rectificador con inductancia en lado de continua), el uso de un filtro paralelo será la mejor opción posible. La correcta sincronización del filtro paralelo, el cual puede estar constituido por varias células de filtrado, permitirá que los armónicos seleccionados circulen mayoritariamente a través del mismo. La inserción del filtro paralelo disminuirá la impedancia que presenta la red a las frecuencias seleccionadas, con lo que mejorará la forma de onda de tensión en el PCC[13].

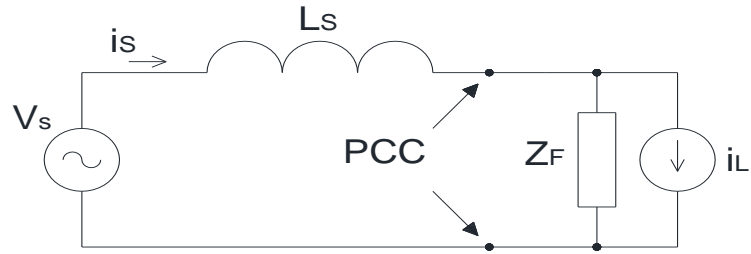


Figura 2.12 Circuito equivalente por fase de conexión de filtro de armónicos, conexión paralelo
Fuente: Rodríguez Cortez, "Análisis de circuitos con cargas no lineales"

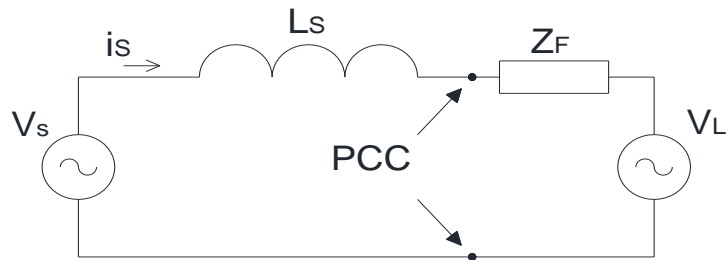


Figura 2.13 Circuito equivalente por fase de conexión de filtro de armónicos, conexión serie
Fuente: Rodríguez Cortez, "Análisis de circuitos con cargas no lineales"

La manera más simple para conseguir una impedancia que resulte selectiva en frecuencia consiste en la utilización de células de filtrado pasivas basadas en circuitos resonantes L-C.

- **Inserción de filtros pasivos paralelo.-** Los filtros pasivos paralelo pueden presentar diferentes estructuras, su misión es de ofrecer un camino de baja impedancia a los armónicos de corriente[13].

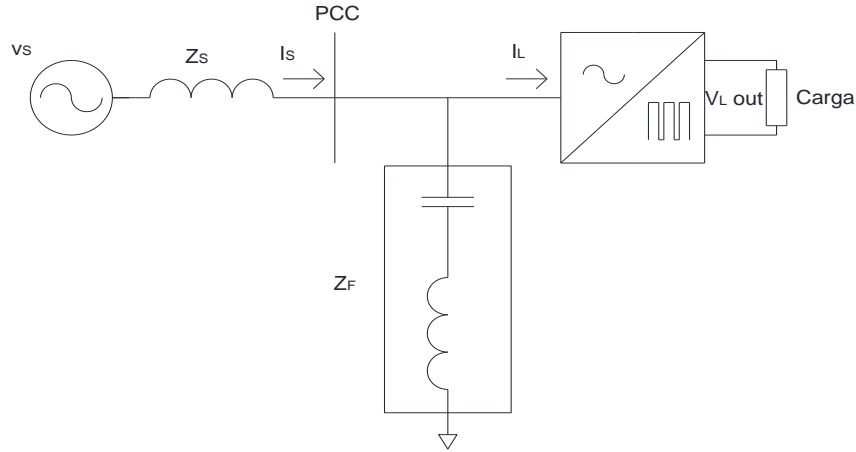


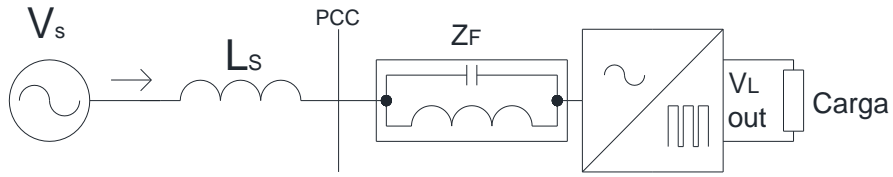
Figura 2.11 Estructura típica de la inserción de un filtro pasivo paralelo
Fuente: Rodríguez Cortez, “Análisis de circuitos con cargas no lineales”

Un filtro paralelo suele estar constituido por varias células L-C sintonizadas que actúan como “trampas” para armónicos específicos, junto con una célula pasa-altas que suele estar sintonizada entre el 9° al 11° armónico. Para el ejemplo anterior se ocupan células sintonizadas al 5° y 7° armónico. Se puede apreciar la impedancia que ofrece la red a la carga (Z) y de la función de transferencia que relaciona los armónicos de la fuente con los de la carga $\left(\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}}\right)$, entonces:

$$I_z = \frac{Z_s Z_F}{Z_s + Z_F} \quad (2.10)$$

$$\frac{I_{Sh}}{I_{Lh}} = \frac{Z_F}{Z_s + Z_F} \quad (2.11)$$

- **Inserción de filtros pasivos serie.-** los filtros pasivos serie pueden mostrar diferentes estructuras y su misión es ofrecer una elevada impedancia a la circulación de los armónicos de la corriente. Este filtro tiene constituido varias células L-C sintonizadas que actúan como un tapón para armónicos característicos, junto a una célula de pasa bajos que suelen estar sintonizada en el armónico 9° y 11° respectivamente[13].



*Figura 2.12 Estructura típica de la inserción de un filtro pasivo serie
Fuente: Rodríguez Cortez, “Análisis de circuitos con cargas no lineales”*

Podemos representar el módulo de la impedancia que ofrece la red a la carga (Z), y de la función de transferencia que relaciona los armónicos de corriente en la fuente con los armónicos de tensión en la carga $\left(\frac{I_{Sh}}{V_{Lh}}\right)$, entonces:

$$Z = Z_S + Z_F \quad (2.12)$$

$$\frac{I_{Sh}}{V_{Lh}} = - \frac{1}{Z_S + Z_F} \quad (2.13)$$

Aquí se puede apreciar un elevadísimo factor de calidad para las diferentes células del filtro pasivo serie. Esto es así para conseguir que la impedancia de la red a frecuencia fundamental no aumente respecto a la situación en la que el filtro serie no estaba conectado. Este elevado factor de calidad puede dar lugar a elevadas corrientes en los componentes de células de filtrado, y a una pérdida de efectividad cuando los valores de los componentes variaran ligeramente debido al envejecimiento[3].

Sin realizar un análisis exhausto, debe resultar sencillo intuir que la acción combinada de los filtros serie y paralelo mejorará las prestaciones del sistema de filtrado de armónicos. Lógicamente, en una carga no lineal en fuente de corriente, el filtro paralelo se conectará a los límites de entrada de esta, mientras que el filtro serie actuará como enlace entre la carga y la red[10].

CAPÍTULO III

En este capítulo se detalla el modelamiento matemático para encontrar la distorsión armónica total de cualquier tipo de carga no lineal conectada a la red eléctrica. Para este estudio se analiza las señales de voltaje y corriente así como también el desfase angular que presenta cada una de las cargas ingresadas al sistema. Mediante los armónicos proporcionados por el Fluke 43B se realiza la serie de Fourier respectiva y se encuentran las curvas características de la corriente de cada carga que ingresa a la red, para luego de ello realizar la convergencia de todas estas señales a través de Montecarlo el cual nos permitirá realizar una simulación del ángulo de desfase con lo cual se puede obtener tanto la distorsión armónica total como la ecuación característica que ingresa a la red eléctrica.

3. MODELAMIENTO MATEMÁTICO DE ELEMENTOS NO LINEALES

3.1 Modelo matemático para armónicos producidos por elementos electrónicos

La toma de datos de parámetros eléctricos se los realiza mediante el Fluke 43B, se puede seleccionar cualquier tipo de artefacto electrónico para esta prueba, siempre y cuando presenten características de señales no lineales. Este estudio se realizó en una vivienda residencial común, usando la red de distribución de 120 voltios, se usa cinco cargas no lineales usadas en una casa, como son la videograbadora, el televisor, el horno microondas, el computador con su monitor y una lámpara fluorescente. Los datos de placa se presentan en las tablas siguientes:

HORNO MICROONDAS				
MARCA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	POTENCIA [W]	FRECUENCIA [Hz]
Panasonic	120	10.5	1100	60

Tabla 3.1 Datos de placa de un horno microondas Panasonic

Fuente: www.panasonic.com

TELEVISOR				
MARCA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	POTENCIA [W]	FRECUENCIA [Hz]
LG	100/220	0,8	95	50/60

*Tabla 3.2 Datos de placa de un horno microondas Panasonic
Fuente: Placa de un televisor*

LAMPARA FLUORESCENTE				
MARCA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	POTENCIA [W]	FRECUENCIA [Hz]
Sylvania	120	0,3	20	50/60

*Tabla 3.3 Datos de placa de un horno microondas Panasonic
Fuente: Placa de una lámpara fluorescente*

VIDEOGRABADORA				
MARCA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	POTENCIA [W]	FRECUENCIA [Hz]
Sony 5.3	120	0,5	55	60

*Tabla 3.4 Datos de placa de un horno microondas Panasonic
Fuente: Placa de una videograbadora*

COMPUTADOR MAS MONITOR				
MARCA	VOLTAJE [V]	CORRIENTE [A]	POTENCIA [W]	FRECUENCIA [Hz]
HP	120	1	120	50/60

*Tabla 3.5 Datos de placa de un horno microondas Panasonic
Fuente: Placa de un computador*

Cada prueba y medición es detallada, el modelamiento matemático a través de Matlab con la serie de Fourier para lograr tener la señal de cada uno de los elementos no lineales para dar continuación a su análisis.

- **Ingreso de curvas características de cada uno de los elementos no lineales**

Para la simulación de los varios artefactos no lineales, hemos realizado diferentes tipos de circuitos, se lo ha hecho a través del Simulink una herramienta muy útil de MatLab en el cuál hemos podido obtener las curvas características de los elementos mencionados.

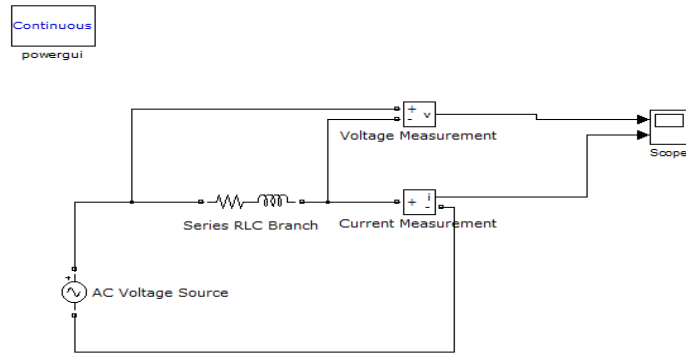


Figura 3.1 Circuito RLC para la simulación de corriente y voltaje de equipos electrónicos
Fuente: [Propio del autor]

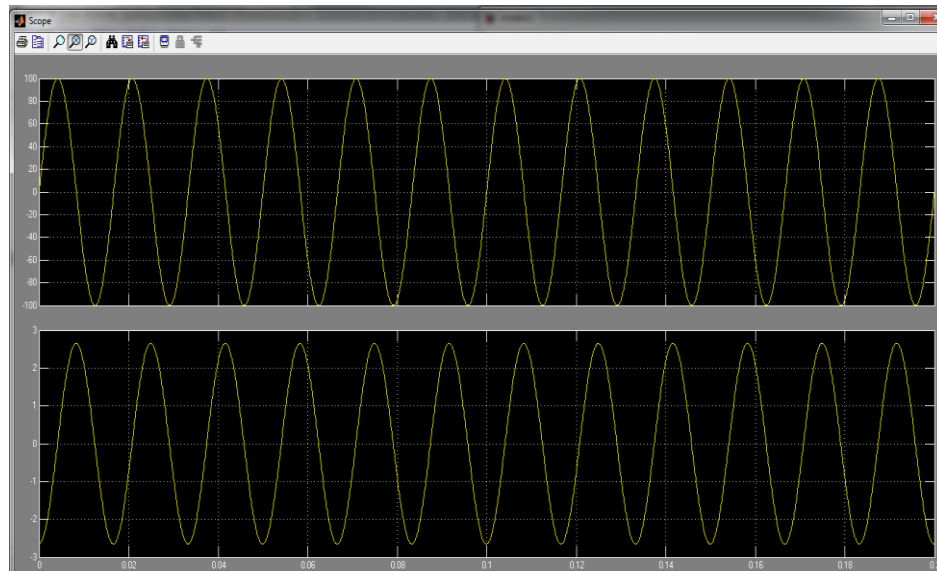


Figura 3.2 Graficas de voltaje y corriente de señal ideal
Fuente: [Propio del autor]

3.2 Ingreso de diferentes tipos de datos usando cargas inductivas y capacitivas

Con la ayuda del Fluke se lograron realizar algunas mediciones de armónicos dando como resultado la siguiente tabla:

ARMÓNICOS DE COMPUTADOR Y MICROONDAS				
ARMÓNICA	COMPUTADOR + MONITOR		HORNO MICROONDAS	
	AMPLITUD [A]	ÁNGULO [°]	AMPLITUD [A]	ÁNGULO [°]
1	0,934	-25	5,161	106
3	0,594	-88	1,580	37
5	0,212	-158	0,589	155
7	0,056	-18	0,278	-135
9	0,141	-93	0,118	32
11	0,059	-152	0,070	151
13	0,027	-54	0,026	-128
15	0,053	-93	0,039	94
17	0,025	-127	0,026	118
19	0,05	-126	0,016	104
21	0,015	-141	0,004	56

Tabla 3.6 Armónicos del computador más monitor y armónicos de microondas en la red
Fuente: Muestra de laboratorio

ARMÓNICOS DE VIDEOGRABADORA Y TELEVISIÓN				
ARMONICA	VIDEOGRABADORA		TELEVISIÓN	
	AMPLITUD [A]	ÁNGULO [°]	AMPLITUD [A]	ÁNGULO [°]
1	0,0748	-34	0,260	-21,5
3	0,0433	-37	0,180	-71
5	0,0410	-86	0,130	-127
7	0,0263	-118	0,056	174
9	0,0161	-143	0,015	73
11	0,0067	-138	0,023	-58
13	0,0058	-113	0,021	-134
15	0,0050	-119	0,010	135
17	0,0024	-163	0,010	19
19	0,0027	-169	0,009	-68

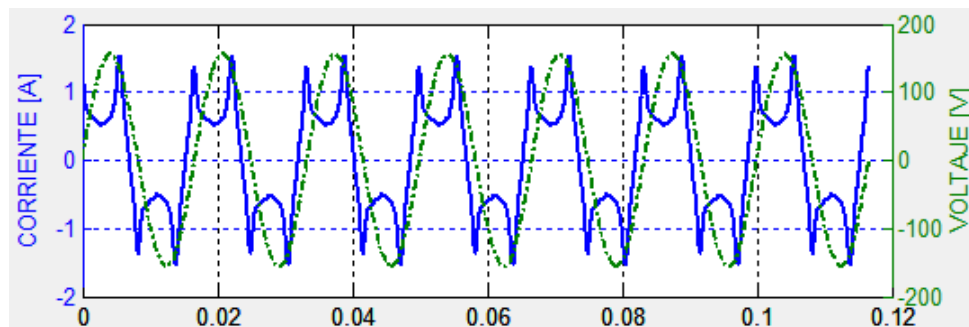
Tabla 3.7 Armónicos de videograbadora y televisión en la red
Fuente: Muestra de laboratorio

ARMÓNICO DE LÁMPARA FLUORESCENTE		
ARMÓNICA	FLUORESCENTE	
	AMPLITUD [A]	ÁNGULO [°]
1	0,0580	-25
3	0,0420	-88
5	0,0200	-158
7	0,0230	-18
9	0,017	-93
11	0,012	-152
13	0,01	-54
15	0,0054	-93
17	0,0045	-127
19	0,0046	-126
21	0,0043	-141

*Tabla 3.8 Armónicos de focos fluorescentes conectados a la red
Fuente: Muestra de laboratorio*

Una vez obtenidos los diferentes armónicos que se tienen en la red, procedemos a obtener las curvas de corriente características de los elementos antes mencionados.

Esta generada tanto la curva de voltaje como de corriente que se genera por efecto de una carga no lineal en el sistema.



*Figura 3.3 Señal de voltaje y corriente de un PC más monitor generada por la serie de Fourier a través de armónicos
Fuente: [Propio del autor]*

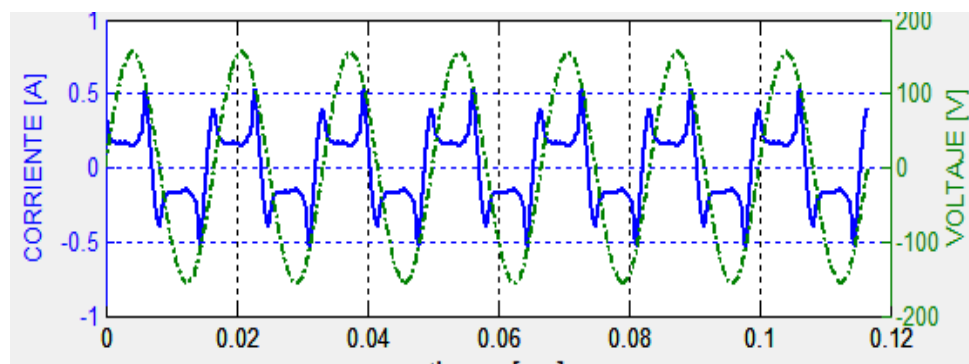


Figura 3.4 Señal de voltaje y corriente de un televisor generada por la serie de Fourier a través de armónicos

Fuente: [Propio del autor]

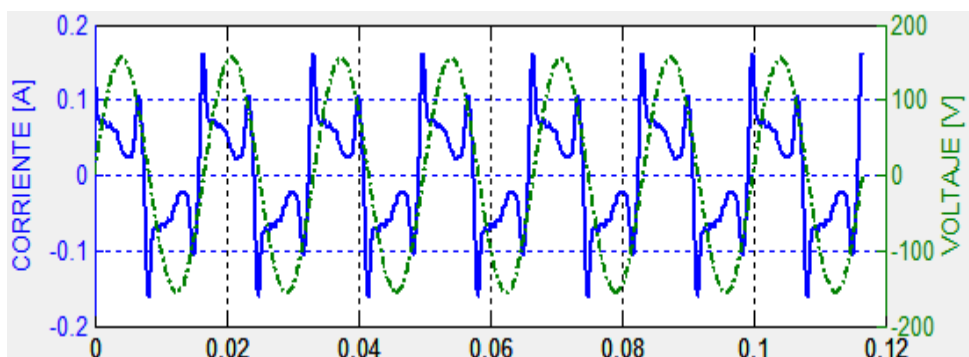


Figura 3.5 Señal de voltaje y corriente de una videograbadora generada por la serie de Fourier a través de armónicos

Fuente: [Propio del autor]

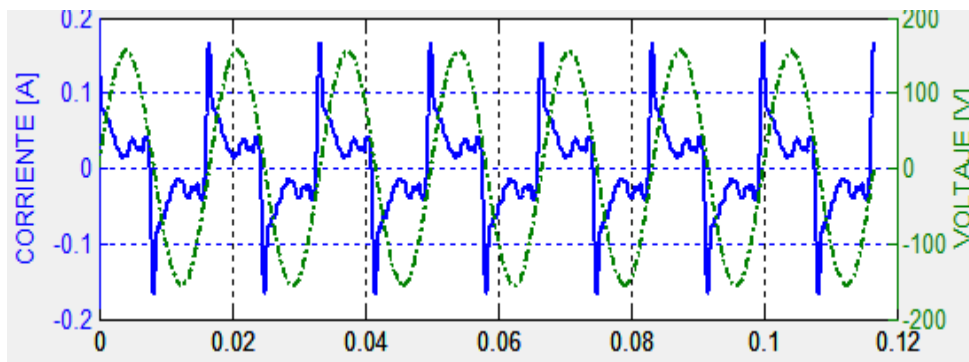


Figura 3.6 Señal de voltaje y corriente de una lámpara fluorescente generada por la serie de Fourier a través de armónicos

Fuente: [Propio del autor]

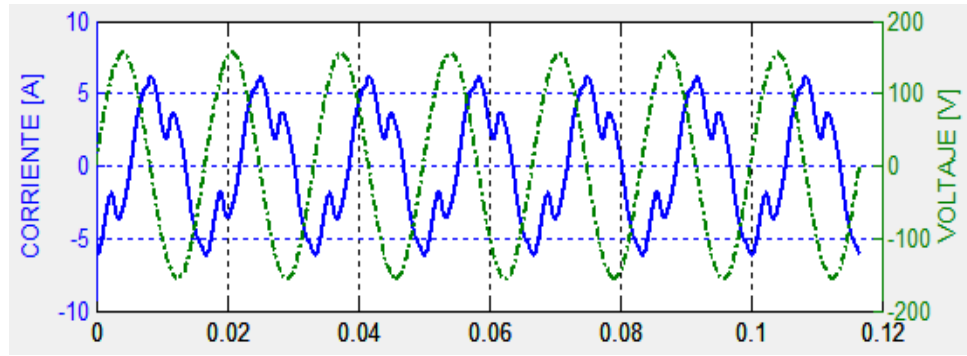


Figura 3.7 Señal de voltaje y corriente de un horno microondas generada por la serie de Fourier a través de armónicos

Fuente: [Propio del autor]

3.3 Índice de Distorsión Armónica total

3.3.1 Modelado individual de cada carga

Antes de realizar el corrido de cada una de las pantallas, se debe cargar los datos generados en el archivo de Excel, para los cual realizamos una interfaz con lo cual ingresamos los datos tomados desde el analizador.

Para el cálculo de la distorsión armónica total se utilizará la ecuación 1.1 presente en el capítulo 1, la cual nos mostrará el valor individual de cada uno de los elementos electrónicos para luego realizar la simulación de todas las cargas en conjunto.

$$THD_i = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^{\infty} I_i^2}}{I_1} * 100 \quad (1.1)$$

Entonces reemplazando los armónicos obtenidos en el analizador y comprobando en Matlab los resultados serían:

- **Computador más monitor**

$$THD = \frac{\sqrt{0,594^2 + 0,212^2 + 0,056^2 + 0,141^2 + 0,059^2 + 0,027^2 + 0,053^2 + 0,025^2 + 0,05^2 + 0,015^2}}{0,934} \quad (3.1)$$

$$THD = 0,7010 = 70,10\%$$

Datos de entrada

Seleccione los electrodomésticos mas significativos en cuanto a generación de armónicos en la residencia.

COMPUTADOR

Cantidad.

3

Valor Nominal. [A] ó [V]

1

AÑADIR

	Electrodoméstico	Cantidad	Valor Nominal	THD
1	COMPUTADOR	1	0,8	0.70303
2	COMPUTADOR	2	0,8	0.70303
3	COMPUTADOR	3	0,8	0.70303
4	COMPUTADOR	3	1	0.70303

Figura 3.8 THD de computador más monitor con diferente corriente y diferente número de unidades
Fuente: [Propio del autor]

- **Televisor**

$$THD = \frac{\sqrt{0,18^2+0,13^2+0,056^2+0,015^2+0,023^2+0,021^2+0,01^2+0,01^2+0,009^2+0,008^2}}{0,26} \quad (3.2)$$

$$THD = 0,8935 = 89,35\%$$

Datos de entrada

Seleccione los electrodomésticos mas significativos en cuanto a generación de armónicos en la residencia.

TELEVISOR

Cantidad.

7

Valor Nominal. [A] ó [V]

1

AÑADIR

	Electrodoméstico	Cantidad	Valor Nominal	THD
1	TELEVISOR	1	0,8	0.89357
2	TELEVISOR	3	0,8	0.89357
3	TELEVISOR	5	1	0.89357
4	TELEVISOR	7	1	0.89357

Figura 3.9 THD de televisor con diferente corriente y diferente número de unidades
Fuente: [Propio del autor]

- Videgrabadora

$$THD = \frac{\sqrt{0,043^2+0,041^2+0,026^2+0,016^2+0,0067^2+0,0058^2+0,05^2+0,002^2+0,0027^2+0,0009^2}}{0,0748} \quad (3.3)$$

$$THD = 0,9091 = 90,91\%$$

Datos de entrada

Seleccione los electrodomésticos mas significativos en cuanto a generación de armónicos en la residencia.

VIDEOGRABADORA

Cantidad.

4

Valor Nominal. [A] ó [V]

0,8

AÑADIR

	Electrodoméstico	Cantidad	Valor Nominal	THD
1	VIDEOGRABADORA	1	0,5	0.90911
2	VIDEOGRABADORA	3	0,5	0.90911
3	VIDEOGRABADORA	4	0,5	0.90911
4	VIDEOGRABADORA	4	0,8	0.90911

Figura 3.10 THD de videgrabadora con diferente corriente y diferente número de unidades
Fuente: [Propio del autor]

- Lámpara fluorescente

$$THD = \frac{\sqrt{0,594^2+0,212^2+0,056^2+0,141^2+0,059^2+0,027^2+0,053^2+0,025^2+0,05^2+0,015^2}}{0,934^2} \quad (3.4)$$

$$THD = 0,9926 = 99,26\%$$

Datos de entrada

Seleccione los electrodomésticos mas significativos en cuanto a generación de armónicos en la residencia.

FLUORESCENTE

Cantidad.

20

Valor Nominal. [A] ó [V]

0,5

AÑADIR

	Electrodoméstico	Cantidad	Valor Nominal	THD
1	FLUORESCENTE	1	0,3	0.9927
2	FLUORESCENTE	10	0,3	0.9927
3	FLUORESCENTE	20	0,3	0.9927
4	FLUORESCENTE	20	0,5	0.9927

Figura 3.11 THD de lámpara fluorescente con diferente corriente y diferente número de unidades
Fuente: [Propio del autor]

- Horno microondas**

$$THD = \frac{\sqrt{1,58^2 + 0,589^2 + 0,278^2 + 0,118^2 + 0,07^2 + 0,026^2 + 0,039^2 + 0,026^2 + 0,016^2 + 0,004^2}}{5,161} \quad (3.5)$$

$$THD = 0,3323 = 33,23\%$$

Datos de entrada

Seleccione los electrodomésticos mas significativos en cuanto a generación de armónicos en la residencia.

MICROONDAS

Cantidad.

3

Valor Nominal. [A] ó [V]

9

AÑADIR

	Electrodoméstico	Cantidad	Valor Nominal	THD
1	MICROONDAS	1	10,5	0.33238
2	MICROONDAS	3	10,5	0.33238
3	MICROONDAS	5	8	0.33238
4	MICROONDAS	3	9	0.33238

Figura 3.12 THD de microondas con diferente corriente y diferente número de unidades
Fuente: [Propio del autor]

3.3.2 Modelado en conjunto de todas las cargas

Al igual que se realizó con las cargas individualmente al comenzar el programa se debe cargar el archivo de Excel generado por el analizador con los respectivos armónicos.

Para la convergencia de todas las señales ingresadas, debemos de realizar el modelamiento matemático por Montecarlo, ya que por el tipo de carga que se tiene cada una tiene diferente ángulo de desfase (esto es propio de cada tipo de carga).

Además cuando nosotros vamos a ingresar a la red las cargas no necesariamente todas entran al mismo tiempo, sino por lo contrario cada una entra en un tiempo distinto o son encendidas en diferente instante. Por tal razón nosotros no podemos determinar una suma o resta de funciones entonces mediante el modelamiento de Montecarlo podemos generar números aleatorios con lo cual el programa buscará la mayor proximidad posible al ángulo de desfase de cada carga y así determinamos la media aritmética y encontraremos el THD del sistema.

Vamos a utilizar la ecuación de Fourier para generar aleatoriamente números randónmicos ya si tener un proximidad al ángulo de desfase. La expresión es:

$$f(x) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(i(2\omega t) + \emptyset) \quad (3.6)$$

Donde:

A_i = amplitud del armónicos dependiendo el orden

n = número de interacciones de Montecarlo

t = tiempo

w = frecuencia angular en rad/s

\emptyset = ángulo de desfasamiento

Como es de suponerse los valores dados anteriormente no se pueden alterar, por ejemplo tanto la amplitud como la frecuencia angular son valores fijos dado por el sistema, pero nosotros a través de Montecarlo vamos a variar el ángulo de desfasamiento para considerar un instante en el cual todas las cargas estén encendidas.

Para mejor interpretación del sistema a la red se realizó la ecuación característica que llega a la red teniendo en cuenta tres escenarios diferentes:

ESCENARIO1	ESCENARIO2	ESCENARIO3
Residencia de estrato económico medio	Residencia de estrato económico alto	Residencia de estrato económico bajo

Tabla 3.9 Consideración de escenarios para modelación del sistema

Fuente: [Propio del autor]

➤ escenario1

Podríamos estimar que en una residencia común existen los siguientes artefactos electrónicos:

- 1 computador más monitor
- 10 lámparas fluorescentes
- 1 microondas
- 2 televisores

Ingresamos los artefactos electrónicos considerando el número de cada uno de ellos con su respectivo valor de corriente o voltaje.

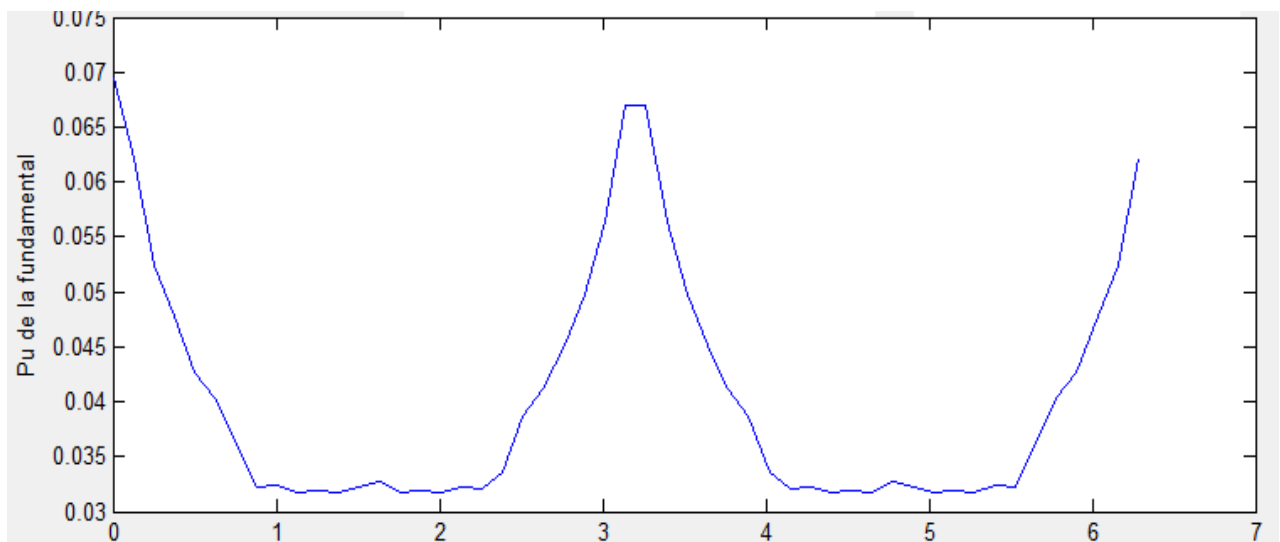


Figura 3.13 Serie temporal de la simulación de cargas mediante Montecarlo

Fuente: [Propio del autor]

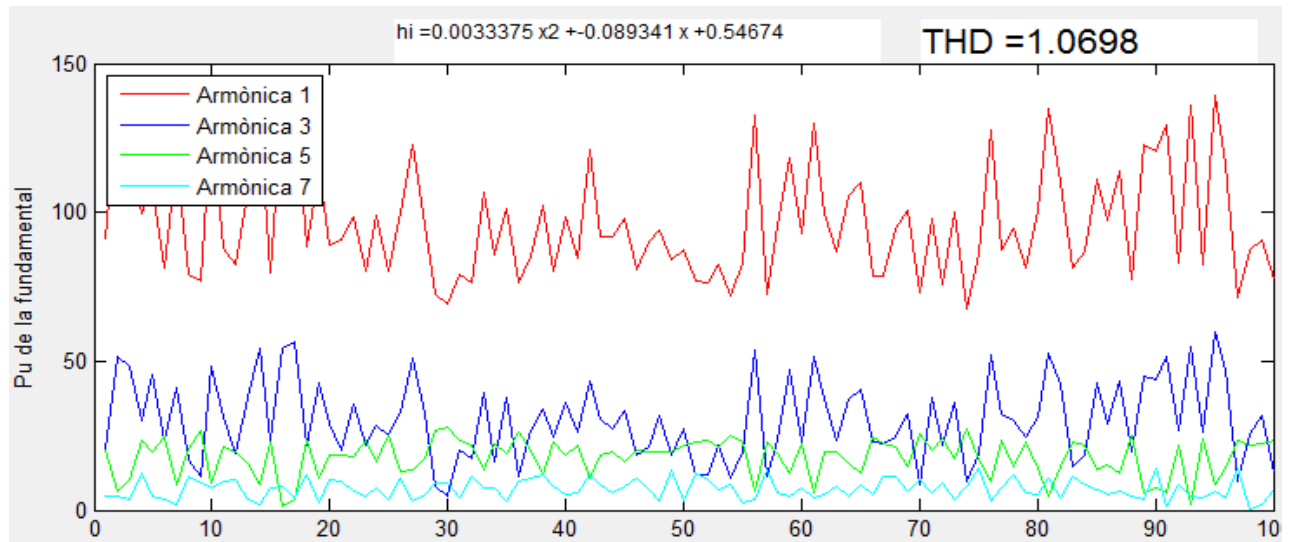


Figura 3.14 Modelamiento de Montecarlo para una residencia común
Fuente: [Propio del autor]

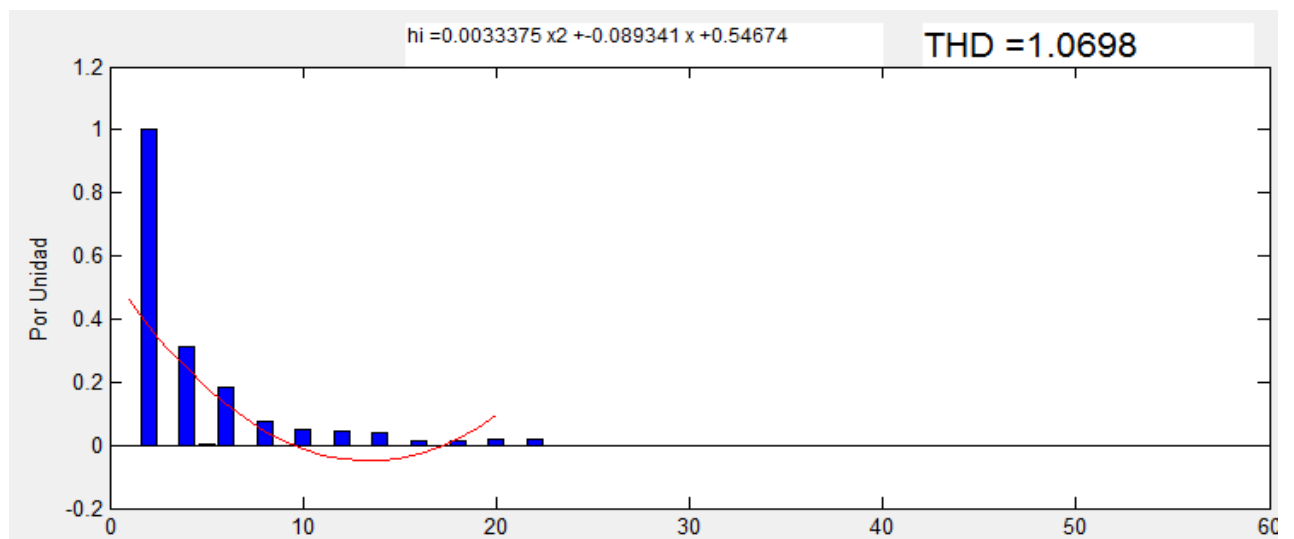


Figura 3.15 Espectrograma generado por las cargas conectadas a la red
Fuente: [Propio del autor]

$$THD = 1,0698$$

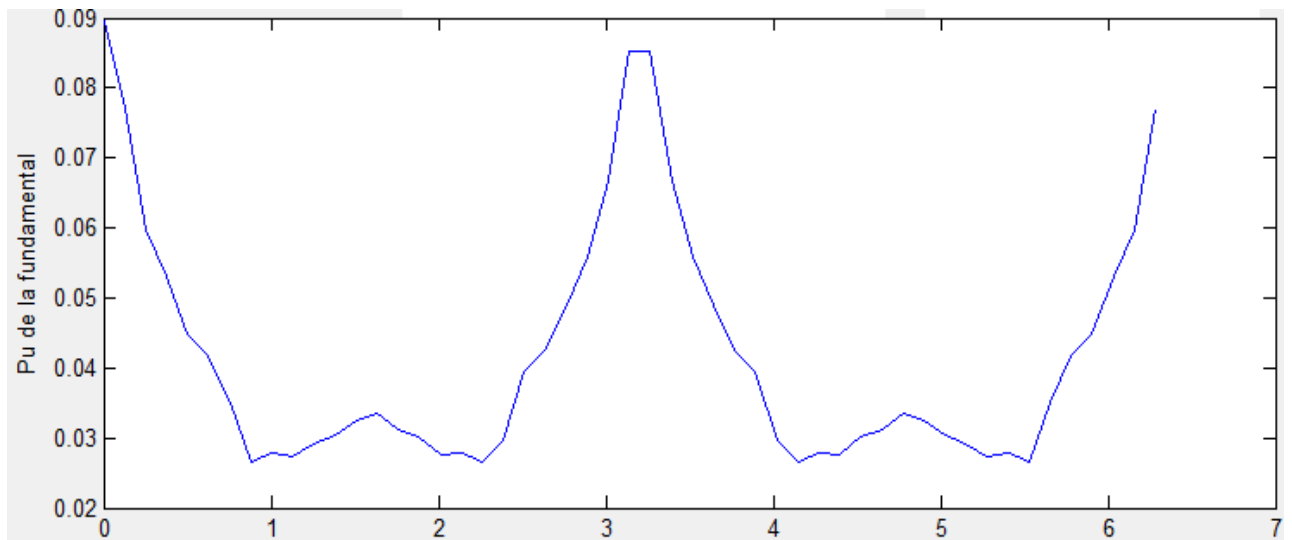
$$h_i = 0.0033375x^2 \pm 0.089341x + 0.54674 \quad (3.7)$$

➤ escenario 2

Podríamos estimar que en una residencia de altos recursos existen los siguientes artefactos electrónicos:

- 3 computador más monitor
- 18 lámparas fluorescentes
- 1 microondas
- 5 televisores
- 1 videograbadora

Ingresamos los artefactos electrónicos considerando el número de cada uno de ellos con su respectivo valor de corriente o voltaje.



*Figura 3.16 Serie temporal de una residencia de altos recursos simulado con diferentes tipos de carga mediante Montecarlo
Fuente: [Propio del autor]*

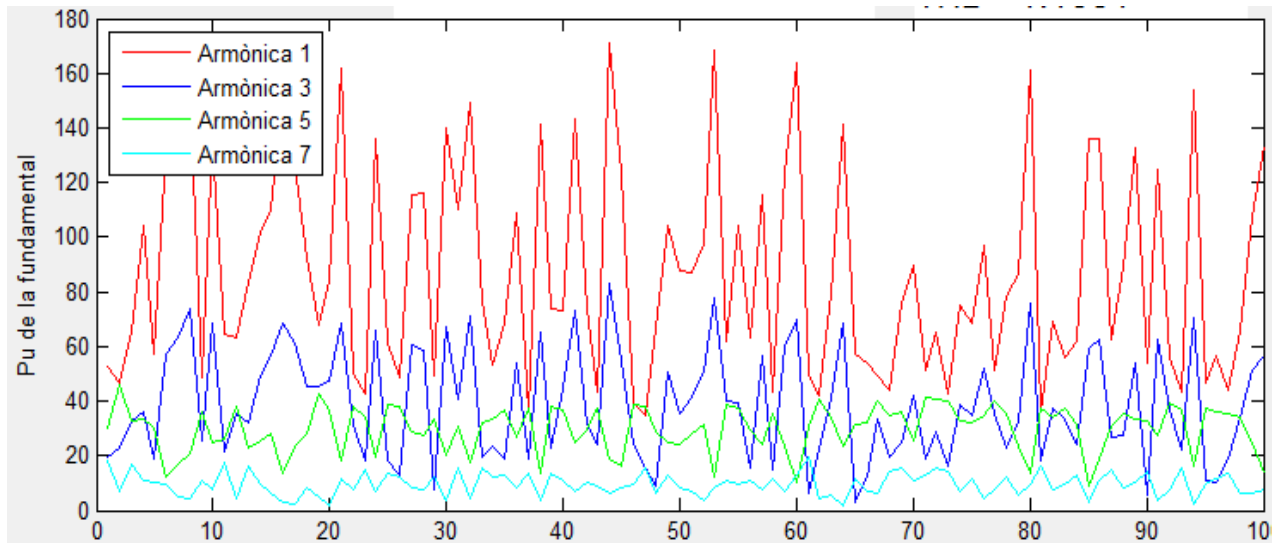


Figura 3.17 Modelamiento de Montecarlo para una residencia de altos recursos
Fuente: [Propio del autor]

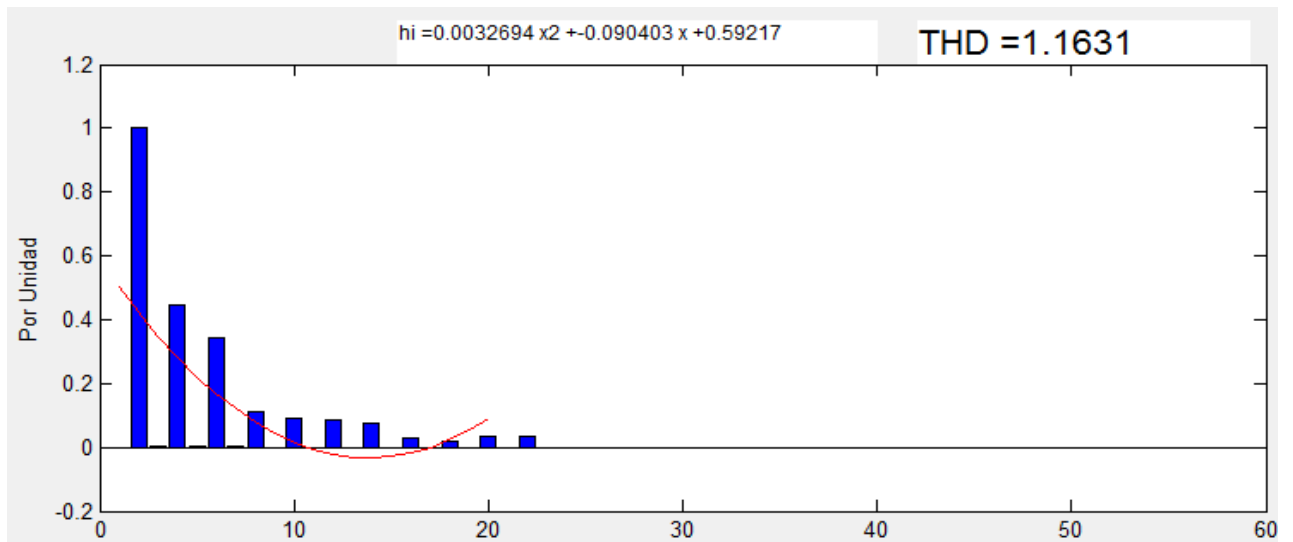


Figura 3.18 Espectrograma de una residencia de altos recursos generado por las cargas conectadas a la red
Fuente: [Propio del autor]

$$\text{THD} = 1,1631$$

$$h_i = 0.0032694x^2 \pm 0.090403x + 0.59217 \quad (3.8)$$

➤ escenario 3

Podríamos estimar que en una residencia de bajos recursos existen los siguientes artefactos electrónicos:

- 6 lámparas fluorescentes
- 1 computador más monitor
- 1 televisor

Ingresamos los artefactos electrónicos considerando el número de cada uno de ellos con su respectivo valor de corriente o voltaje.

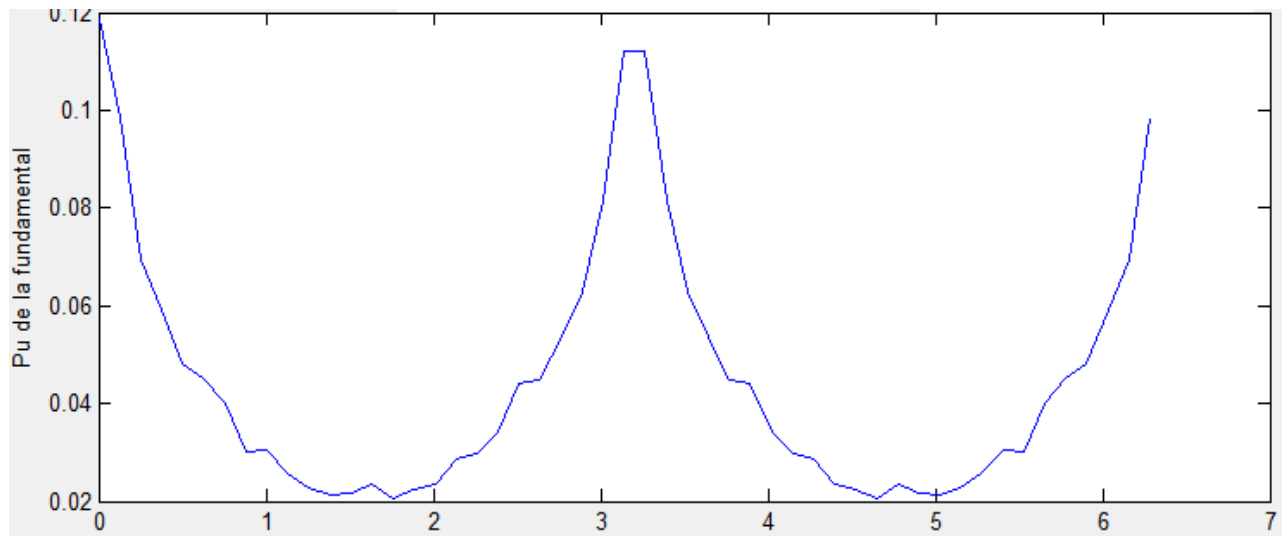


Figura 3.19 Serie temporal de una residencia de altos recursos simulado con diferentes tipos de carga mediante Montecarlo

Fuente: [Propio del autor]

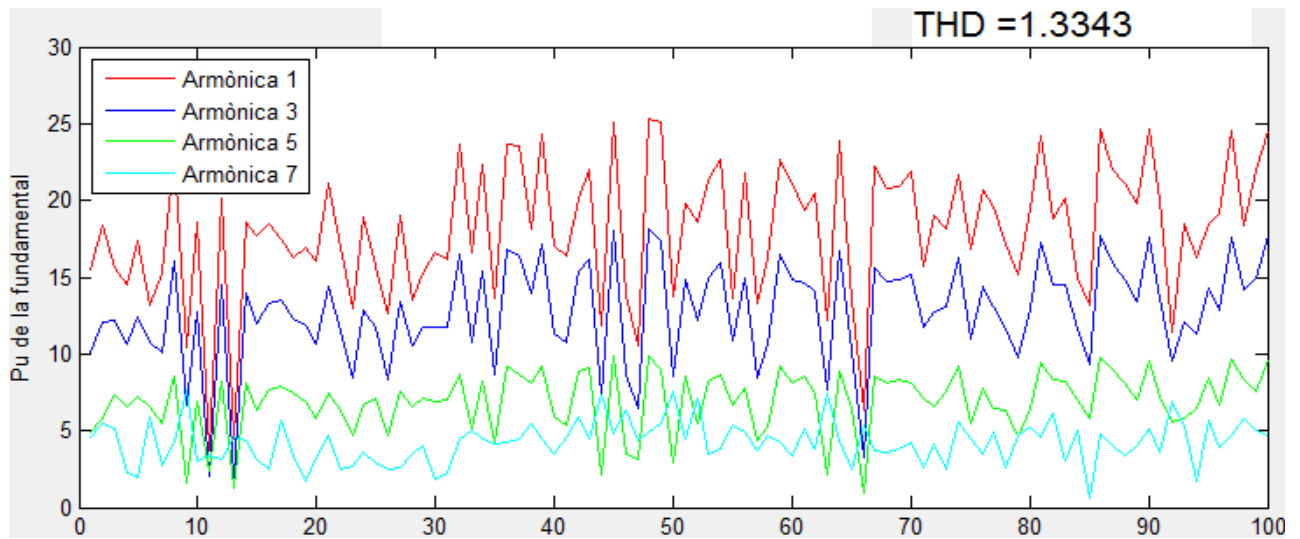


Figura 3.20 Modelamiento de Montecarlo para una residencia de bajos recursos
Fuente: [Propio del autor]

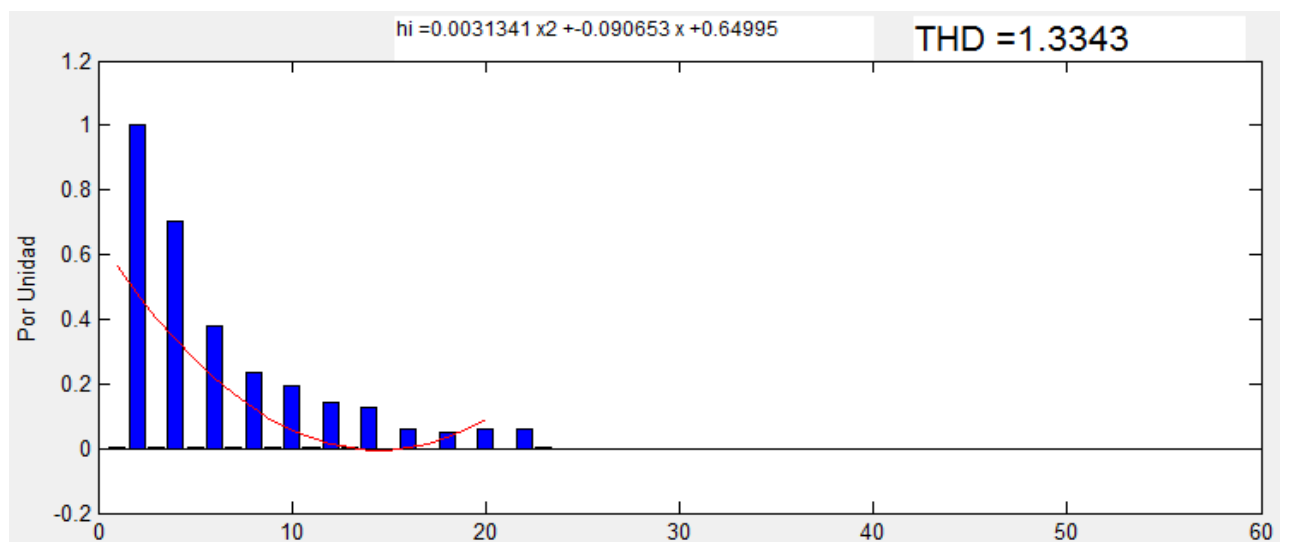


Figura 3.21 Espectrograma de una residencia de bajos recursos generado por las cargas conectadas a la red
Fuente: [Propio del autor]

$$\text{THD} = 1,3343$$

$$h_i = 0.0031341x^2 \pm 0.090653x + 0.64995 \quad (3.10)$$

CAPÍTULO IV

En el presente capítulo se analiza y calcula de manera comparativa algunos indicadores útiles al momento de emprender un proyecto de THD presente en el sector eléctrico y con mira al mejoramiento de la calidad de energía. De los datos obtenidos anteriormente de las residencias con diferente status económico se hará una comparación usando un filtro activo para ver su funcionalidad en el sistema y así podremos si es óptimo o no para nuestro sistema.

4. ANALISIS DE RESULTADOS-FACTIBILIDAD

4.1 Comparación de resultados y rendimiento utilizando filtros en el sistema de alimentación

- **Análisis de cargas individualmente**

Carga	Número de aparatos	I [A]	THD
Computador más monitor	1	0,8	0,70303
	2	0,8	0,70303
	3	0,8	0,70303
	3	1	0,70303

Tabla 4.1 THD de computador más monitor variando la corriente y el número de unidades

Fuente: Simulación en Matlab

Carga	Número de aparatos	I [A]	THD
Televisor	1	0,8	0,89357
	3	0,8	0,89357
	5	1	0,89357
	7	1	0,89357

Tabla 4.2 THD de televisor variando la corriente y el número de unidades

Fuente: Simulación en Matlab

Carga	Número de aparatos	I [A]	THD
Lámpara Fluorescente	1	0,3	0,9927
	10	0,3	0,9927
	20	0,3	0,9927
	20	0,5	0,9927

Tabla 4.3 THD de televisor variando la corriente y el número de unidades
Fuente: Simulación en Matlab

Carga	Número de aparatos	I [A]	THD
Horno microondas	1	10,5	0,33238
	3	10,5	0,33238
	5	8	0,33238
	3	9	0,33238

Tabla 4.4 THD de microondas variando la corriente y el número de unidades
Fuente: Simulación en Matlab

Carga	Número de aparatos	I [A]	THD
Horno microondas	1	0,5	0,90911
	3	0,5	0,90911
	4	0,5	0,90911
	4	0,8	0,90911

Tabla 4.5 THD de horno microondas variando la corriente y el número de unidades
Fuente: Simulación en Matlab

Como se puede apreciar en las tablas anteriores al estar conectadas un mismo número de cargas idénticas, al variar el número de ellos o incluso al aumenta o disminuir la corriente el THD sigue siendo el mismo, ya que la ecuación 1.1 hace que el THD permanezca constante.

- **Análisis de cargas en conjunto por escenarios**

- escenario 1

Residencia de estrato económico medio	THD	Total de cargas en la residencia
	1,0698	14

Tabla 4.6 THD residencial de estrato económico medio a plena carga
Fuente: Simulación mediante Matlab

- escenario 2

Residencia de estrato económico alto	THD	Total de cargas en la residencia
	1,1631	28

Tabla 4.7 THD residencial de estrato económico alto a plena carga
Fuente: Simulación mediante Matlab

- escenario 3

Residencia de estrato económico bajo	THD	Total de cargas en la residencia
	1,3343	8

Tabla 4.8 THD residencial de estrato económico bajo a plena carga
Fuente: Simulación mediante Matlab

Se puede evidenciar que existe una variación de THD cuando ingresan diferentes tipos de cargas a la red, lo que no sucedía en el análisis anterior porque anteriormente el THD permanecía constante.

El mayor índice de distorsión armónica se presenta en la residencia de estrato económico bajo, mientras que el menor valor aparece en la residencia de estrato económico alto. Esto es por la presencia de diferentes cargas ingresadas en la red.

Con un filtro el sistema sería el mismo y las señales no variarían en nada ya que el filtro evalúa frecuencias y nuestro sistema examina las diferentes corrientes de la red.

4.2 Mejoramiento de la calidad de servicio mejorando el índice de distorsión armónica

Teniendo como base la ecuación característica que ingresa a la red, podemos determinar las diferentes señales sean de voltaje o de corriente ya que si se reemplaza en la ecuación de segundo orden el valor de x por el orden de los armónicos obtendremos la amplitud de cada uno de ellos, los cuales pueden estar en amperios o en voltios.

$h_i = 0.0033375x^2 \pm 0.089341x + 0.54674$	
Orden de armónico	Amplitud
1	0,4607365
3	0,3087545
5	0,1834725
7	0,0848905
9	0,0130085
11	-0,0321735
13	-0,0506555
15	-0,0424375
17	-0,0075195
19	0,0540985
21	0,1424165
23	0,2574345
25	0,3991525
27	0,5675705
29	0,7626885
PROM	0,2553715

Tabla 4.9 Valores de amplitud para residencia de estatus medio cada armónico según su orden
Fuente: [Propio del autor-Microsoft Excel]

$h_i = 0.0032694x^2 \pm 0.090403x + 0.59217$	
Orden de armónico	Amplitud
1	0,6858424
3	0,8928036
5	1,12592
7	1,3851916
9	1,6706184
11	1,9822004
13	2,3199376
15	2,68383
17	3,0738776
19	3,4900804
21	3,9324384
23	4,4009516
25	4,89562
27	5,4164436
29	5,9634224
31	6,5365564
PROM	3,1534834

Tabla 4.10 Valores de amplitud para residencia de status alto cada armónico según su orden
Fuente: [Propio del autor-Microsoft Excel]

$h_i = 0.0031341x^2 \pm 0.090653x + 0.64995$	
Orden de armónico	Amplitud
1	0,7437371
3	0,9501159
5	1,1815675
7	1,4380919

9	1,7196891
11	2,0263591
13	2,3581019
15	2,7149175
17	3,0968059
19	3,5037671
21	3,9358011
23	4,3929079
25	4,8750875
27	5,3823399
29	5,9146651
31	6,4720631
PROM	3,1691261

Tabla 4.11 Valores de amplitud para familia de estatus bajo cada armónico según su orden
Fuente: [Propio del autor-Microsoft Excel]

Como puede notarse que en la residencia de estrato económico medio se tendrá una calidad de energía.

4.3 Evaluación del punto óptimo del sistema de alimentación

Todo sistema eléctrico debe tener una calidad de energía para ello tanto la IEEE y como el CONELEC han fijado mediante análisis límites para la distorsión armónica tanto en corriente como en voltaje.

Según la IEEE el rango de THD máximo que debe tener un sistema residencial de bajo voltaje se definió en la tabla Tabla 2.3 , en donde para cada uno de los sistemas el valor final de THD está dentro de la norma establecida, ya que es menor al 5 pu en los tres sistemas antes simulados.

Residencia de estrato económico medio	THD
	1,0698

Tabla 4.12 THD producido por 1PC, 10 fluorescentes, 1 microondas y 2 televisores
Fuente: Simulación mediante Matlab

Residencia de estrato económico alto	THD
	1,1631

Tabla 4.13 THD producido por 1PC, 10 fluorescentes, 1 microondas y 2 televisores
Fuente: Simulación mediante Matlab

Residencia de estrato económico bajo	THD
	1,3343

Tabla 4.14 THD producido por 1PC, 10 fluorescentes, 1 microondas y 2 televisores
Fuente: Simulación mediante Matlab

CONCLUSIONES

En el desarrollo de este trabajo se obtuvieron las ecuaciones para cada componente de los armónicos que se presentan por causa de diferentes tipos de equipos electrónicos conectados a la red en sistemas residenciales. Por medio del analizador se obtuvieron datos para realizar el modelamiento matemático, para que usando la simulación de Montecarlo se hiciera converger diferentes tipos de señales de corriente, con el objetivo de encontrar el THD total de tres residencias clasificadas por su estrato económico.

La distorsión armónica total es un parámetro que depende de la corriente nominal o del voltaje nominal del equipo a evaluar, es por esto que cuando se coloca un grupo con los mismos equipos electrónicos, estos generan el mismo THD que si solo estuviera conectado uno.

El THD se realiza como la suma de armónicas elevadas al cuadrado dividido para la corriente nominal, sin embargo cada armónica se puede atenuar o amplificar dependiendo del ángulo de desfase de cada una, ya que cada carga posee un ángulo de desfase específico o a vez al momento de entrar al sistema no todas parten en el mismo tiempo, por esta razón se simula este ángulo de desfase usando el método de Montecarlo.

Las disminuciones más significativas se registraron a partir de los armónicos de orden elevado, sin tener comparación con los de orden más bajo, por tal razón se los podría considerar despreciables, Esta conclusión se debe a que los armónicos de orden 3 y 5 presentan pequeñas dispersiones en el ángulo de fase,

Al conectar diferentes tipos de cargas en los sistemas residenciales, la distorsión armónica total refleja un decrecimiento, debido a que en algún momento, la corriente alta de algún elemento se atenúa con la corriente más pequeña de otro elemento. También se debe considerar que la distorsión armónica se refleja en el valor pico más elevado de la red.

La forma de tendencia generada por el espectrograma final, sigue la forma de onda de una parábola, por tal razón se escogió una ecuación de segundo orden. Considerando

también la regresión de mínimos cuadrados con lo cual conseguimos los parámetros de la ecuación característica $ax^2 + bx + c$. Además se debe tener en cuenta la facilidad de resolución de tal ecuación.

RECOMENDACIONES

Utilizar filtros pasivos pasa bajos para la eliminación de armónicos en residencias no es factible puesto que el THD originado por en cualquier residencia no sobrepasa el límite establecido por le IEEE. Además no es económicamente factible ni regulado para el consumidor final ya que esto debería ser un valor a pagar en la parte de distribución, más no por la residencial.

En caso de querer obligar el uso de filtros para la eliminación de armónicos a cualquier tipo de residencia, aunque no sea factible económicamente para el consumidor, se debería considerar una política de mejoramiento de calidad de energía dirigida hacia el consumidor.

En este modelo matemático del sistema residencial hacia la distribución, se debe considerar las diferencias superiores al 30% ya que estas pueden presentarse al efectuar la predicción de armónicos de tensión con los métodos de suma aritmética de corrientes y el de suma vectorial.

Para una mayor precisión de resultados, es preferible trabajar con datos técnicos extraídos una fuente real como es el uso de analizador Fluke 43B con el cual tenemos valores con errores al 0,3% ya que un modelamiento matemático es solo una aproximación al valor real.

Este modelado matemático es capaz de realizar simulaciones para cualquier tipo de elemento electrónico, usa una interfaz entre Excel y Matlab. Para ello primero debemos de usar el Fluke 43B y luego de esto exportar los histogramas que se generan y con ello se calculará la distorsión armónica total y la ecuación que sale a la red.

REFERENCIAS

- [1] J. A. Suárez, G. F. Di Mauro, and D. A. C. Agüero, “Estudio de atenuación y diversidad en áreas residenciales,” 2005.
- [2] F. V. Vera, “Estudio de armónicos que los focos ahorradores introducen a la red eléctrica,” Quito, 2011.
- [3] F. Fabrer L. "Contaminación armónica producida por cargas no lineales de baja potencia : modelo matemático y casos prácticos" Harmonic Pollution Produced by Low Power Nonlinear Loads : Mathematical Model and Practical Cases,” pp. 189–198, 2010.
- [4] P. Suarez, "Linking Climate Knowledge and Decisions : Humanitarian Challenges Linking Climate Knowledge and Decisions : Humanitarian Challenges", no. 7. 2009.
- [5] S. M. Ieee, IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems IEEE Recommended Practices and. 1992.
- [6] Barrionuevo Guerra Estuardo Daniel, “Estudio de la influencia de la regulación en vacío de transformadores de distribución sobre la norma de calidad de energía del Conelec referida a niveles de voltaje,” 2011.
- [7] P. D. E. Imbabura, “Estudio de las cargas generadoras de armónicos para la Contrusctora Sympaer ” 2010.
- [8] D. E. D. Morales and F. H. Martínez, “EL FENÓMENO DE DISTORSIÓN ARMÓNICA EN REDES ELÉCTRICAS,” vol. 003, no. 1, pp. 46–54, 2001.
- [9] Clavijo Moreno Carlos, “Análisis integral de la Calidad del Servicio Eléctrico en la S/E Bellavista de 69 kV ubicada en la Provincia de Imbabura"Escuela politécnica nacional,” 1995.
- [10] “Análisis de distorsión armónica en redes de distribución de energía eléctrica utilizando matlab ®,” 2011.
- [11] L. Distorsi, V. Fig, C. Directa, and V. Tabla, “C1 +,” vol. 01, no. 55, pp. 41–42.
- [12] ELECTROMAGAZINE, “Armónicos,” número4, 2003.
- [13] S. C. C. Ieee, S.-I. Standards, and C. Committee, “1. Introducción Introducción,” 1999.
- [14] A. Encalada and L. A. Salazar. "Calidad de Energia para el Distrito Metropolitano de Quito".2005

- [15] HAYT William, "Análisis de circuitos en ingeniería", 7ma edición, México: Editorial Mcgraw-hill, 2007.
- [16] F. Compactas, E. N. La, S. Residenciales, and U. El, "Universidad veracruzana," 2012.
- [17] RAHID Muhammad, "Electrónica de Potencia", 3ra edición, editorial Pearson México 2004.
- [18] NORMA IEEE 519 - 1992, "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia", p. 3
- [19] NORMA IEEE 519 - 1992, "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia", p. 4
- [20] NORMA IEEE 519 - 1992, "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia", p. 5
- [21] NORMA IEEE 519 - 1992, "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia", p. 31
- [22] Fabricio Vasco Vera. "Efecto del empleo de focos ahorradores. Tesis 2011. Universidad Politécnica Salesiana.
- [23] NORMA IEEE 519 - 1992, "Recomendaciones Prácticas y Requerimientos de la IEEE para el Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia", p. 12
- [24] P. Crnosija, "Determination of voltage distortion factor for a network loaded with several DC motor drives", IEE Proc. Part C, Volumen 131, N° 3. (1984).
- [25] A. Mansoor, W. M. Grady, A. H. Chowdhury, M. Samotyj, "An investigation of harmonics attenuation and diversity among distributed single-phase power electronic loads". IEEE Transactions on Power Delivery, Volumen 10, N° 1, (1995)
- [26] W. M. Grady, A. Mansoor, E. F. Fuchs, P. Verde, M. Doyle, "Estimating the net harmonic currents produced by selected distributed single-phase loads: computers, televisions, and incandescent light dimmers". PowerEngineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, Volumen: 2, 27-31 Enero 2002, Pag. 1090 - 1094 vol.2
- [27] A. E. Emmanuel, T. J. Gentile, D. J. Pileggi, E. M. Gulachenski, C. E. Root, "The Effect of Modern Compact Fluorescent Lights on Voltage Distortion", IEEE Transaction On Power Delivery, Vol. 8, N° 3, Julio 1993.
- [28] Grainger John J., Stevenson William Jr., "Análisis de Sistemas de Potencia", McGraw Hill 1996.

- [29] A. Mansoor, W. M. Grady, "Analysis of compensation factors influencing the net harmonic current produced by single-phase nonlinear loads". Harmonics and Quality of Power, 1998. Proceedings 8th. International Conference on, Volumen: 2, pp 883-889, Oct. 1998
- [30] FINK, Donald. Manual de Ingeniería Eléctrica, 1era edición, México: editorial Interamericana de México, 1996.
- [31] IEEE Working group in Nonsinusoidal Situations, "Practical definitions for power systems with nonsinusoidal waveforms and unbalanced loads: A discussion," IEEE Trans. Power Del., vol. 11, no. 1, pp. 79–87, Jan. 1996.
- [32] HOFMANN Harald y GANSLANDT Rüdiger, Manual - Cómo planificar con luz, 1era edición, Barcelona: editorial Bertelsmann International.
- [33] Eduardo Rivas, Daniel Almonacid, "Evaluación de la Contaminación Armónica en redes de baja tensión subterráneas del centro de Concepción", UBB, 2003.
- [34] L. Prikler, H. K. Høidalen, ATPDraw version 3.5 for Windows9x/NT/2000/XP, User's Manual, SEfAS TR F5680, ISBN 82-594-2344-8, Agosto 2002
- [35] D. Czarkowski and A. Domijan, Jr., "Harmonic content of PWM adjustable speed drive waveforms-analysis and metering implications," in Proc. 7th Int. Conf. Harmonics Quality of Power, 1996, pp. 48–53.
- [36] P. J. Moore, I. E. Portugués, "The Influence of personal computer processing modes on line current harmonics". IEEE Transaction on Power Delivery, Volumen 18, N° 4, (2003).
- [37] J. Arrillaga, N. R. Watston, and S. Chaen, Power Systems Quality Assessment. New York: Wiley, 2000.
- [38] Electromagnetic Compatibility (EMC)—Part 4, Section 7: General Guide on Harmonics and Interharmonics Measurements and Instrumentation, for Power Supply System and Equipment and Equipment Connected Thereto, 1991.
- [39] Antonio Gómez Expósito, "Análisis y Operación de Sistemas de Energía Eléctrica", McGraw Hill 2002.
- [40] A. Mansoor, W. M. Grady, R. S. Thallam, M. T. Doyle, S. D. Krein, M. J. Samotyj, "Effect of supply voltage harmonics on the input current of single-phase diode bridge rectifier loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Volumen 10, N° 3, (1995).
- [41] Richard C. Dorf, James A. Svoboda, "Circuitos Electricos", Alfaomega 2003

- [42] HAYT William, “Análisis de circuitos en ingeniería”, 7ma edición, México: Editorial Mcgraw-hill, 2007.
- [43] EDMINISTER, Joseph. Circuitos Eléctricos, 1era edición, España: McGRAW-HILL, 2005.
- [44] A. E. Emanuel, “Power in nonsinusoidal situations—A review of definitions and physical meaning,” IEEE Trans. Power Del., vol. 5, no. 3, pp.1377–1389, Jul. 1990.
- [45] Control de Armónicos en Sistemas Eléctricos de Potencia, New York, 101.
- [46] International Electrotechnical Vocabulary—Chapter 131: Electric and Magnetic Circuits, 1978
- [47] Gilberto Enríquez Harper, “Elementos de Diseño de las instalaciones Eléctricas Industriales”, Limusa 2004.
- [47] Ángel P, Nicolás B, Manuel Llorente, «La Amenaza de los Armónicos y sus soluciones», Editorial Paraninfo, 2000.
- [49] ENRÍQUEZ, Harper. El ABC del alumbrado y las instalaciones eléctricas en baja tensión, 2da edición, México, 2006.
- [50] EMPRESA ELÉCTRICA QUITO, Normas para sistemas de distribución parte A guía para diseño, Quito 31 de marzo de 2009, p.152

ANEXOS

Anexo A1

Se presenta la programación del modelo matemático generado en Matlab con los datos del analizador Fluke 43B proporcionado en la Universidad Politécnica Salesiana, donde se puede apreciar las lecturas de los armónicos generados por diferentes equipos electrónicos conectados en paralelo a la red.

```
1 function varargout = ArmonicosResidencialesEL(varargin)
2
3 gui_Singleton = 1;
4 gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
5                   'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
6                   'gui_OpeningFcn',   @ArmonicosResidencialesEL_OpeningFcn, ...
7                   'gui_OutputFcn',    @ArmonicosResidencialesEL_OutputFcn, ...
8                   'gui_LayoutFcn',    [], ...
9                   'gui_Callback',     []);
10
11 if nargin && ischar(varargin{1})
12     gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
13 end
14
15 if nargin
16     [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
17 else
18     gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
19 end
20
21 %Programacion al iniciar el programa-----
22 function ArmonicosResidencialesEL_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
23
24     handles.output = hObject;
25     guidata(hObject,handles);
26
27 clear;
28 clc;
29 global filenameAparatos folderAparatos NombresAparatos ArmonicosAparatos numAparatos
30 [file, folderAparatos]=uigetfile('*.xlsx');
31 filenameAparatos=fullfile(folderAparatos,file);
32 % filenameAparatos='C:\Users\JOFFRE\Desktop\Programa EL\TABLA TESIS.xlsx';
33 [datos,txt,row]=xlsread(filenameAparatos);
34 tempLong=size(datos);
35 Aparato=txt(:,tempLong(2)+1);
36 Aparato(1)=[];
37
38 for i=1:tempLong(2)
39     temp1(:,i)=isnan(datos(:,i));
40     temp12(1,i)=numel(temp1(temp1(:,i)==0)) ;
41 end
42 NombresAparatos = Aparato;
43 ArmonicosAparatos = datos;
44 ArmonicosAparatos(:,1)=[];
45 temp02=size(ArmonicosAparatos);
46 for i=1:temp02(2)/2
47     valor=1/ArmonicosAparatos(1,2*i-1);
48     ArmonicosAparatos(:,2*i-1)=ArmonicosAparatos(:,2*i-1)*valor;
49 end
50 NombresAparatos;%AQUI ESTA LA VARIABLE CON LOS NOMBRES DE LOS APARATOS
```

```

51 - ArmonicosAparatos;%AQUI ESTA LA VARIABLE CON ARMONICOS NORMALIZADOS A 1A o 1V.
52 - numAparatos=1;
53 - global aparatoNumero aparatoSeleccion cantidad ValorNominal THD tablaAparatosDatos
54
55 - aparatoNumero=[];
56 - aparatoSeleccion={};
57 - cantidad={};
58 - ValorNominal={};
59 - THD={};
60 - tablaAparatosDatos=[];
61
62 - function varargout = ArmonicosResidencialesEL_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
63
64 - varargout{1} = handles.output;
65
66 - global filenameAparatos folderAparatos NombresAparatos ArmonicosAparatos
67
68 - set(handles.HMIaparatos,'String',NombresAparatos);
69 - clc;
70 - %-----
71
72 - %PROGRAMACION-----
73 - function anadir_Callback(hObject, eventdata, handles) %Programacion de boton anadir
74
75 - global filenameAparatos folderAparatos NombresAparatos ArmonicosAparatos tablaAparatosDatos numAparatos aparatoNu
76
77 - global ValorNominal THD
78
79 - aparatoNumero(numAparatos)=get(handles.HMIaparatos,'Value');
80 - aparatoSeleccion(numAparatos)=char(NombresAparatos(aparatoNumero(numAparatos)));
81 - cantidad{numAparatos}=num2str(get(handles.HMIcantidad,'String'));
82 - ValorNominal{numAparatos}=num2str(get(handles.HMIValorNominal,'String'));
83 - tempTHD=0;
84
85 - for i=2:50
86
87 -     tempTHD=tempTHD+(ArmonicosAparatos(i,2*aparatoNumero(numAparatos)-1))^2;
88
89 - end
90
91 - THD{numAparatos}=num2str((tempTHD^(0.5))/ArmonicosAparatos(1,2*aparatoNumero(numAparatos)-1));
92 - tablaAparatosDatos=[aparatoSeleccion,cantidad,ValorNominal,THD];
93
94 - set(handles.tablaAparatos,'Data',tablaAparatosDatos);
95 - numAparatos=numAparatos+1;
96
97 - function HMIVisualizar_Callback(hObject, eventdata, handles) %Programacion del boton VISUALIZAR
98
99 - global ArmonicosAparatos
100 - estado1 = get(handles.serieTemporal,'Value');
101 - estado2 = get(handles.espectrograma,'Value');
102
103 - aparatoNumeroVisualizar=get(handles.HMIaparatos,'Value');
104 - serieTemporal01=0;
105 - if estado1==1
106
107 -     ejeX=[0:pi()/200:10*pi()];
108 -     for i=1:50
109 -         serieTemporal01=serieTemporal01+(ArmonicosAparatos(i,2*aparatoNumeroVisualizar-1)*sin(i*ejeX+degtorad(Armo
110 -     end
111 -     graficaTemporal=handles.graficaSeries;
112 -     plot(graficaTemporal,ejeX,serieTemporal01,'b')
113 -     xlabel(graficaTemporal,'Tiempo');
114 -     ylabel(graficaTemporal,'%');
115 -     title(graficaTemporal,'SERIE TEMPORAL');
116
117 - end
118
119 - if estado2==1
120
121 -     graficaEspectrograma=handles.graficaSeries;
122 -     bar(graficaEspectrograma,ArmonicosAparatos(:,2*aparatoNumeroVisualizar-1),'r')
123 -     xlabel(graficaEspectrograma,'Orden Armónica');
124 -     ylabel(graficaEspectrograma,'%');
125 -     title(graficaEspectrograma,'ESPECTROGRAMA');

```

```

126 - end
127
128 - function calcular_Callback(hObject, eventdata, handles) %Programacion del boton calcular, modelamiento.
129
130 - global aparatoNumero NombresAparatos ArmonicosAparatos
131 - ValoresTabla=get(handles.tablaAparatos,'Data');
132 - aparatoNumero;
133 - cantidad=str2double(ValoresTabla(:,2));
134 - ValorNominal=str2double(ValoresTabla(:,3));
135
136
137 - ejeX=[0:pi()/1000:2*pi()];
138 - iteraciones=str2num(get(handles.montecarlo,'String'));
139 - global armonicosMontecarloTotal mediaArmonicosMontecarlo montecarloSerieTemporal THD
140
141 - armonicosMontecarloTotal=[];
142
143
144 - for ite=1:iteraciones
145 -     serietemporal03=0;
146
147 -     for i=1:length(aparatoNumero)
148 -         serietemporal02=0;
149 -         for j=1:cantidad(i)
150 -             serieTemporal01=0;
151
152 -             angulorandom=random('Normal',0,pi()/3,1,1);
153 -             for k=1:50
154 -
155 -                 serieTemporal01=serieTemporal01+(ValorNominal(i)*(ArmonicosAparatos(k,2*aparatoNumero(i)-1)*sin(k*ejeX
156 -
157 -             end
158 -             serietemporal02=serietemporal02+serieTemporal01;
159
160 -         end
161 -         serietemporal03=serietemporal03+serietemporal02;
162 -     end
163 -     serietemporal03=serietemporal03';
164 -     xf=fft(serietemporal03)/length(serietemporal03);
165 -     Xm=2*abs(xf);
166 -     armonicosMontecarloTotal(1:51,ite)=Xm(1:51,1); %Aqui variable de iteraciones
167
168 - end
169
170 - armonicosMontecarloTotal=armonicosMontecarloTotal';
171 - mediaArmonicosMontecarlo=mean(armonicosMontecarloTotal);
172 - mediaArmonicosMontecarlo=mediaArmonicosMontecarlo/mediaArmonicosMontecarlo(2); %Aqui variable espectrograma
173 - set(handles.uipanel2,'Visible','off');
174
175 - global yfit p

```

```

176
177 - % x=[1:1:15];
178 - % y=mediaArmonicosMontecarlo(2:16);
179 - p=polyfit([1:1:20],mediaArmonicosMontecarlo(2:21),2);
180 - yfit=polyval(p,[1:1:20]);
181
182 - % calculate coefficients a and b
183 - n = length(x);
184 - y2 = log(y);
185 - j = sum(x);
186 - k = sum(y2);
187 - l = sum(x.^2);
188 - m = sum(y2.^2);
189 - r2 = sum(x .* y2);
190 - b = (n * r2 - k * j) / (n * l - j^2)
191 - a = exp((k-b*j)/n)
192 - yfit=a*exp(b*x);
193
194 - montecarloSerieTemporal = ifft(mediaArmonicosMontecarlo');
195 - montecarloSerieTemporal=2*abs(montecarloSerieTemporal);%Aqui variable temporal
196 - ejeXMontecarlo=[0:pi()/25:2*pi()];
197
198 - tempTHD=0;
199
200 - for i=2:51

```

```

201     tempTHD=tempTHD+(mediaArmonicosMontecarlo(i))^2;
202 -
203
204 -end
205
206     THD=num2str((tempTHD^(0.5))/mediaArmonicosMontecarlo(2));
207
208
209
210     graficaTotalArmonicos=handles.graficaSeries;
211
212     disp('termino')
213
214     function verResul_Callback(hObject, eventdata, handles)
215
216     global armonicosMontecarloTotal mediaArmonicosMontecarlo montecarloSerieTemporal THD
217
218     estado1 = get(handles.espectrol,'Value');
219     estado2 = get(handles.monte1,'Value');
220     estado3 = get(handles.serie1,'Value');
221
222     if estado1==1
223
224         graficaEspeResul=handles.graficaSeries;
225         bar(graficaEspeResul,mediaArmonicosMontecarlo,'b')
226
227
228
229         xlabel(graficaEspeResul,'Armónica');
230         ylabel(graficaEspeResul,'Por Unidad');
231         title(graficaEspeResul,'Espectrograma estimado');
232         hold on
233         global yfit p
234         plot(graficaEspeResul,[1:1:20],yfit,'r')
235         set(handles.ecuacion,'String',strcat('hi = ',num2str(p(1)), ' x2 +',num2str(p(2)), ' x + ',num2str(p(3))));
236         %p=polyfit([0:1:50],mediaArmonicosMontecarlo,1);
237         %yfit=polyval(p,[0:1:50]);
238         hold off
239     end
240
241     if estado2==1
242         ejex=[1:1:100];
243         graficaMonteResul=handles.graficaSeries;
244         length(armonicosMontecarloTotal(:,1));
245         length(ejex);
246         plot(graficaMonteResul,ejex,armonicosMontecarloTotal(:,2),'r')
247         hold on
248         plot(graficaMonteResul,ejex,armonicosMontecarloTotal(:,4),'b')
249         plot(graficaMonteResul,ejex,armonicosMontecarloTotal(:,6),'g')
250         plot(graficaMonteResul,ejex,armonicosMontecarloTotal(:,8),'c')
251         xlabel(graficaMonteResul,'Radianes');
252         ylabel(graficaMonteResul,'Pu de la fundamental');
253         title(graficaMonteResul,'Evolución Montecarlo');
254
255
256
257         legend(graficaMonteResul,'Armónica 1','Armónica 3','Armónica 5','Armónica 7','Location','northwest');
258         hold off
259     end
260
261     if estado3==1
262         ejeXMontecarlo=[0:pi()/25:2*pi()];
263         graficaMonteSerie=handles.graficaSeries;
264         plot(graficaMonteSerie,ejeXMontecarlo,montecarloSerieTemporal,'b');
265         xlabel(graficaMonteSerie,'tiempo');
266         ylabel(graficaMonteSerie,'Pu de la fundamental');
267         title(graficaMonteSerie,'Serie Temporal');
268         hold off
269     end
270
271     set(handles.THDERESULT,'String',strcat('THD = ',num2str(THD)));
272
273
274
275     %-----
276     %Programacion propia de matlab-----
277
278     function HMIaparatos_Callback(hObject, eventdata, handles)

```

```

283
284 function HMIcantidad_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
285
286 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
287     set(hObject,'BackgroundColor','white');
288 end
289
290 function HMIValorNominal_Callback(hObject, eventdata, handles)
291
292 function HMIValorNominal_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
293
294 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
295     set(hObject,'BackgroundColor','white');
296 end
297
298 function pruebas_Callback(hObject, eventdata, handles)
299
300 function montecarlo_Callback(hObject, eventdata, handles)
301
302 function montecarlo_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
303
304 if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
305     set(hObject,'BackgroundColor','white');
306 end
307

```